

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu

The use of the optical system ARAMIS in determining deformation limits of deep-drawing sheet metal

David Pospíchal
KSP - TP - 822

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*
Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	68
Počet tabulek	9
Počet příloh	12
Počet obrázků	58
Počet vzorců	9

Datum: 5.6.2009

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství

Diplomant: David Pospíchal

Téma práce: Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu

The use of the optical system ARAMIS in determining deformation limits of deep-drawing sheet metal

Číslo DP: KSP - TP - 822

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Jiří Sobotka – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Předkládaná diplomová práce se zabývá tvorbou diagramů mezních přetvoření (DMP) pomocí optického měřicího systému ARAMIS. Součástí je stručný přehled o DMP a o jiných optických měřících systémech. Závěrem je zhodnocen vliv jednotlivých parametrů na výsledek experimentu.

Abstract:

This diploma thesis deals with the creation of forming limit diagrams (FLD) using the optical measuring system ARAMIS. It also includes a brief overview of FLD and other optical measuring systems. Finally, it evaluates the impact of various parameters on the outcome of the experiment.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....
David Pospíchal
Durychov 1675
511 01 Turnov

Poděkování:

Rád bych poděkoval zejména vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Solfronkovi, PhD., mému konzultantovi Ing. Jiřímu Sobotkovi a ostatním pracovníkům Katedry strojírenské technologie z Oddělení tváření kovů a plastů za poskytnutou pomoc, cenné rady a připomínky a zapůjčené materiály.

Také bych rád poděkoval svým rodičům za podporu v průběhu celého mého studia.



OBSAH

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	TAŽENÍ VÝLISKŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU	11
2.2	DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	13
2.2.1	Definice diagramů mezních přetvoření	14
2.2.2	DMP – početní metody	17
2.2.3	Porovnání s experimentem	18
2.2.4	Vliv materiálových charakteristik na polohu KMP	20
2.2.5	DMP – experimentální způsoby	21
2.3	OPTICKÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY	23
2.3.1	Měřicí systém ATOS	24
2.3.2	Měřicí systém PONTOS	26
2.3.3	Měřicí systém TRITOP	28
2.3.4	Měřicí systém ARGUS	29
2.3.5	Měřicí systém ARAMIS	30
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
3.1	Cíle experimentu	32
3.2	Statická zkouška tahem	33
3.3	Experimentální metoda k získání diagramu mezních přetvoření pomocí optického systému ARAMIS	36
3.3.1	Postup	36
3.3.2	Příprava Optického systému ARAMIS	38
3.3.3	Příprava vzorků	40
3.3.4	Vlastní měření	41
3.3.5	Volba osvětlení	42
3.3.6	Způsob získání mezního přetvoření φ_1, φ_2	45
3.3.7	Výsledky měření	52
3.4	Ověření rychlosti tvářecího nástroje	55
3.4.1	Postup	55
3.4.2	Výsledky měření	57
3.5	Stanovení deformační rychlosti	57
4	DISKUSE VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	61
5	ZÁVĚR	65



6	SEZNAM POUŽITÉ LITERARURY	67
7	SEZNAM PŘÍLOH	68

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení:	Jednotka:	Význam:
A_{80mm}	[%]	tažnost
A_g	[%]	homogení tažnost
b	[mm]	šířka zkušebního vzorku
C	[MPa]	koeficient monotónního zpevnění
c	[s ⁻¹]	deformační rychlost
CAD		Computer Aided Design
CAM		Computer Aided Manufacturing
CCD		Charge Coupled Device
d	[mm]	průměr elementu
D	[mm]	průměr zkušebního vzorku
DMP		Diagram Mezních Přetvoření
FEM		Finite Element Method
FLC		Forming Limit Curve
FLD		Forming Limit Diagram
HS		High Speed
KMP		Křivka Mezních Přetvoření
l	[mm]	délka elementu
LED		Light Emitting Diode
m	[-]	exponent citlivosti materiálu na rychlost deformace
m_σ	[-]	ukazatel stavu rovinné napjatosti
m_φ	[-]	ukazatel stavu přetvoření
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
NC		Numerical Control
r	[-]	součinitel normálová anizotropie
R	[MPa]	smluvní napětí
R_m	[MPa]	meze pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu



s	[-]	výběrová směrodatná odchylka
t	[s]	čas
T	[-]	parametr zeslabení
x_0, x_{45}, x_{90}	[-]	hodnoty ve směrech 0° , 45° , 90° dle směru válcování
x_s	[-]	střední aritmetický průměr
ε	[%]	poměrné prodloužení
σ	[MPa]	skutečné napětí
φ	[-]	skutečná deformace
φ_1	[-]	hlavní deformace
φ_2	[-]	vedlejší deformace
φ_{IK}	[-]	kritická intenzita přetvoření

1 ÚVOD

Mezi nejrozšířenější technologie plošného tváření patří tažení. Tažením plechů vzniká prostorový výlisek. V automobilovém průmyslu se pak nejvíce uplatňuje tažení nepravidelných tvarů, tzv. karosářských výlisků. S tím také souvisí mnoho problémů, které se výrazně liší od problematiky hlubokého tažení jednoduché rotační nádoby.

Jednou z metod hodnocení tvářitelnosti plechů jsou i diagramy mezních přetvoření (DMP), nebo také FLD z anglického forming limit diagram. Tyto diagramy nám vymezí oblast bezpečného tváření a pomohou nám tak při návrhu tvaru výlisku a při volbě nejvhodnějšího materiálu.

Způsobů jak získat tyto diagramy je celá řada, a to jak početních, tak i experimentálních. S rozvojem techniky, především pak té počítačové, se na trhu objevují stále nové optické systémy spolu se softwarem, které nám pomáhají při experimentálních řešeních.

Tato práce je zaměřena na experimentální zjištění diagramu mezních přetvoření pomocí optického systému ARAMIS a na stanovení vlivu frekvence snímání dat na výsledek diagramu mezních přetvoření. Dále je stanovována deformační rychlost tvářeného materiálu pro různé stavy napjatosti a různé rychlosti tvářecího nástroje.

V závěru bude diskutován vliv jednotlivých parametrů měření na výsledek FLD.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TAŽENÍ VÝLISKŮ KAROSÁŘSKÉHO TYPU [1], [2]

Jak již bylo v úvodu řečeno, je tažení výlisků nepravidelných tvarů, jejichž typickým představitelem jsou karosářské výlisky, více problematické než hluboké tažení jednoduché rotační nádoby. Je to zapříčiněno tím, že při lisování se oproti hlubokému tažení uplatňují jak posuvy, tak vypínání. Podle toho se výlisky nepravidelných tvarů dělí na:

- ploché výlisky, při jejichž vzniku se uplatňuje hlavně vypínání a méně posuvy,
- výlisky se složitým a hlubokým prostorovým tvarem, při jejichž vzniku se uplatní hlavně hluboké tažení a méně vypínání.

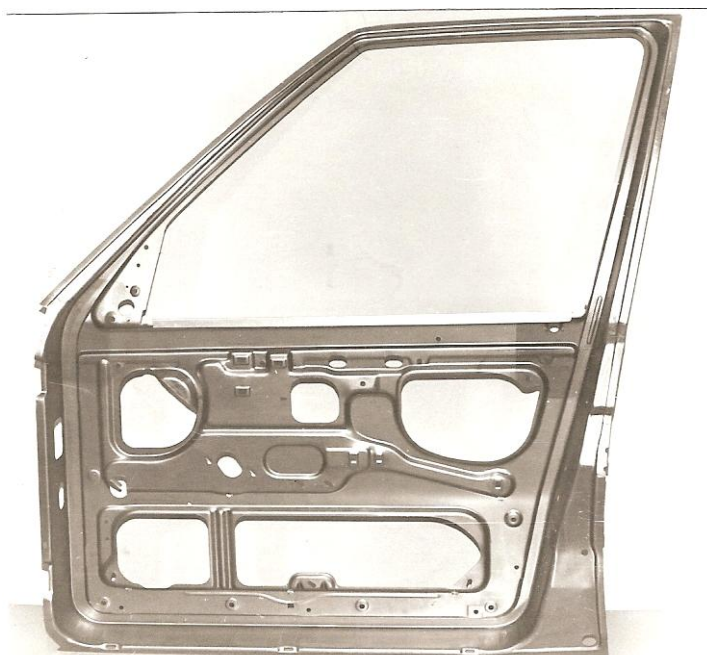
Protože se jedná o výlisky nepravidelných tvarů, jejichž tvar se mění v závislosti na konstrukci a tvaru karoserie, tak je nutno stále řešit i základní otázky technologie tažení daného dílu. Spolehlivým vodítkem nebývají ani zkušenosti získané řešením technologie tažení podobného výlisku.

V současné době se je možno při výrobě výlisků opřít o mocného pomocníka a tím je komplexní analýza přetvoření. Ta je založena na využití deformačních sítí a právě na diagramech mezních přetvoření. Jejím záměrem je pomocí povrchových deformačních sítí určit hodnoty přetvoření v kritických oblastech výlisku a poté je porovnat s mezními hodnotami přetvoření zachycenými formou diagramu mezních přetvoření. Příklad výlisku nepravidelného tvaru je vidět na obr. 2.1.1 a obr. 2.1.2.

Největší využití diagramů mezních přetvoření je však při návrhu výlisku v kombinaci s numerickým výpočtem.



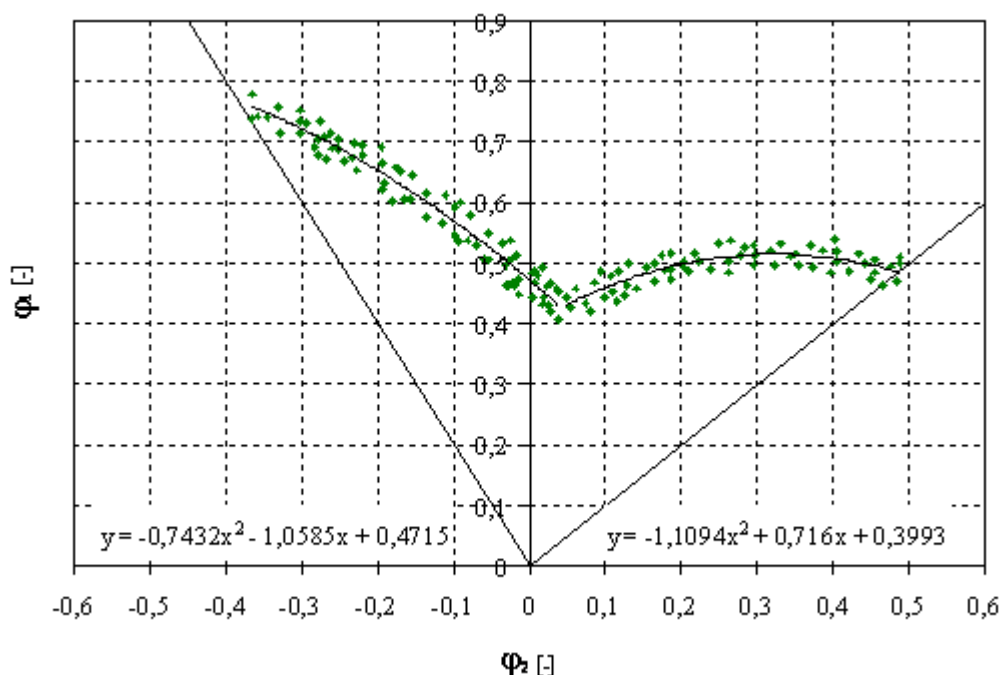
Obr. 2.1.1 Dokončená druhá tažná operace [2]



Obr. 2.1.2 Kompletní výlisek vnitřních předních dveří vozu Favorit [2]

2.2 DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ [1], [2], [3]

Základem diagramů mezních přetvoření (DMP) je pásmo bodů o souřadnicích φ_1 a φ_2 , která jsou definována jako logaritmická přetvoření a představují mezní přetvoření. Pomocí regresní analýzy se jimi proloží křivka mezních přetvoření, která určuje oblast bezpečného tváření. Ukázka diagramu mezních přetvoření je na obr. 2.2.1. Praktické využití DMP je k hodnocení plastičnosti plechů, srovnání jejich plastických vlastností v daném rozsahu stavů přetvoření, nebo jejich využití ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výlisků.



Obr. 2.2.1 Hodnoty mezních přetvoření s odpovídající KMP, materiál Salzgitter PRETEX

2.2.1 Definice diagramů mezních přetvoření

Při lisování souvisí ztráta stability procesu přetvoření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu plechu přenášet tvářecí sílu. Mezní stupeň přetvoření daného plechu závisí i na stavu napjatosti v průběhu tažení. Označme hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1 , σ_2 , ($\sigma_3 = 0$, přičemž $|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$) a odpovídající přetvoření φ_1 , φ_2 , φ_3 jsou definována jako logaritmické deformace.

Rovinnou napjatost lze vyjádřit ve tvaru $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$, a pak ukazatel stavu rovinné napjatosti m_σ

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2.2.1.1)$$

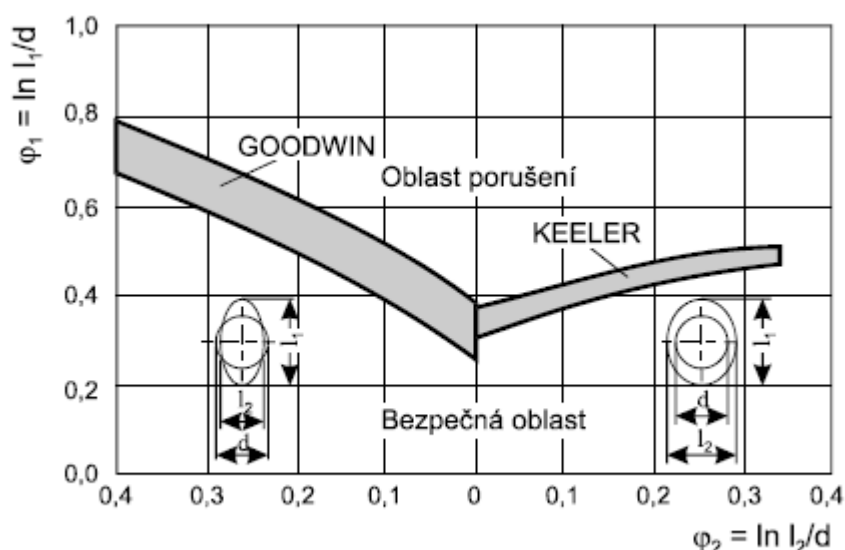
nabývá hodnot $m_\sigma \in < -1, 1 >$. Mezní stavy přetvoření daného materiálu je pak možno vyjadřovat za daných teplotně-rychlostních podmínek v závislosti na napjatosti. Všechna tři hlavní přetvoření lze vyjádřit jednou veličinou nazývanou kritická intenzita přetvoření φ_{iK} ,

$$\varphi_{iK} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_{1K}^2 + \varphi_{2K}^2 + \varphi_{1K} \varphi_{2K}} \quad (2.2.1.2)$$

Tímto způsobem lze získat diagram mezních přetvoření v souřadnicích m_σ - φ_{iK} .

Diagramy mezních přetvoření se dají získat i kratší cestou než přes výpočet intenzity přetvoření a stavu napjatosti spočteného pomocí vztahů mezi tenzory napětí a přetvoření. K určení diagramu mezních přetvoření lze bezprostředně využít zjištěné hodnoty hlavních normálových přetvoření φ_{1K} a φ_{2K} . S touto myšlenkou přišli poprvé v 60. letech minulého století pánové Keeler a Goodwin. Ti jako první představili diagram mezních

přetvoření jako závislost největšího přetvoření φ_1 na nejmenším přetvoření φ_2 v rovině plechu. Jednotlivé stavy napjatosti charakterizované ukazatelem m_σ (pro prosté zatěžování $m_\sigma = \text{konst.}$) jsou v tomto diagramu představovány paprsky vycházejícími z počátku souřadného systému. Tedy i diagram s těmito souřadnými osami vyjadřuje závislost velikosti mezních přetvoření na napjatosti. Ukázka diagramu tohoto typu je na obr. 2.2.1.1. Křivka (pásma) mezních přetvoření vymezuje v diagramu dvě plochy. První plochu příslušnou přípustným přetvořením pod křivkou a druhou plochu, která přísluší nepřípustným přetvořením a nachází se nad křivkou. Křivka mezních přetvoření tvoří hranici obou ploch a určuje tak kritická přetvoření pro daný mezní stav.



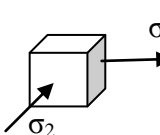
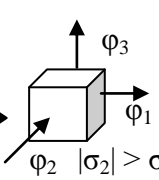
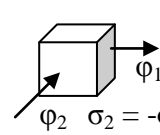
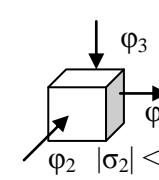
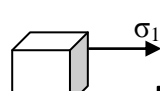
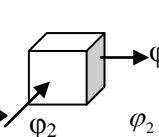
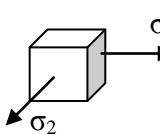
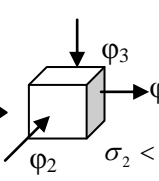
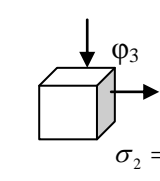
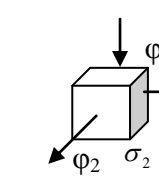
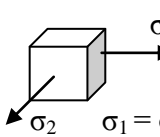
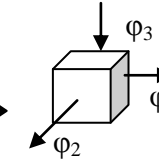
Obr. 2.2.1.1 Goodwin-Keelerův diagram ve skutečných deformacích [3]

Na výlisku, kde se obecně uplatňují stavy napjatosti nelze určit přímo velikost napětí. Ale pomocí deformační sítě lze bezprostředně změřit hodnoty přetvoření jako následek působící napjatosti. Pak je vhodné definovat ukazatel stavu přetvoření m_φ vztahem

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (2.2.1.3)$$

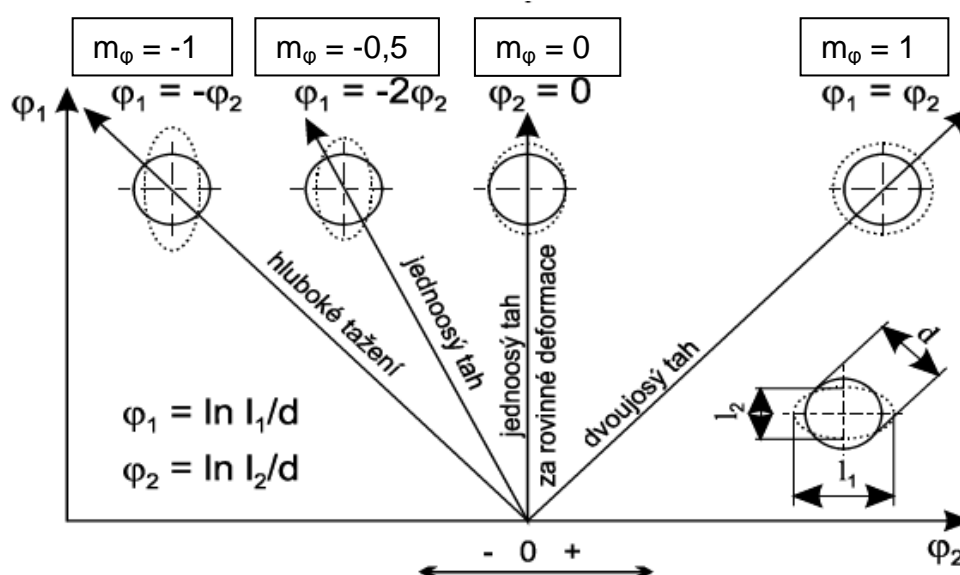
Ukazatel stavu přetvoření m_φ je ve stejném intervalu jako ukazatel stavu rovinné napjatosti m_σ čili $m_\varphi \in < -1, 1 >$. Stejně jako u m_σ paprsky, které vycházejí z počátku souřadného systému, určují stav přetvoření $m_\varphi = \text{konst.}$, čili určují tzv. lineární deformační stopu.

Stavy napjatosti a přetvoření (viz. obr. 2.2.1.2) je možné charakterizovat v těchto diagramech příslušnými deformačními stopami podle obr. 2.2.1.3. Zároveň je v něm znázorněn i kruhový element deformační sítě před a po přetvoření při dané napjatosti. Z praktických zkušeností vyplynulo, že ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření ohraničených hodnotami $m_\varphi = -0,5$ a $m_\varphi = 1$. V tomto rozsahu je pak nutno při sestavování diagramů mezních přetvoření modelovat stavy přetvoření.

	napjatost	přetvoření
1		  
2		
3		  
4		

Obr. 2.2.1.2 Schéma stavů napjatosti a přetvoření uplatňující se při tažení výlisků

Velikost mezních přetvoření je dána nejen plastičností daného plechu, ale je i značně závislá na způsobu jakým definujeme mezní stav. Za ten lze považovat buď dosažení meze pevnosti materiálu, nebo porušení soudržnosti plechu tvárným lomem. K tomu, abychom mohli určit diagram mezních přetvoření, je nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Modelovat různé stavy m_φ lze experimentálně či početně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného plechu.



Obr. 2.2.1.3 Stavy přetvoření v DMP charakterizované ukazatelem m_φ [3]

2.2.2 DMP – početní metody

Proces plastického přetvoření plechu platný obecně pro jakýkoli výlisek je v podstatě procesem postupné lokalizace přetvoření, zužování plasticky přetvářených oblastí, což v konečné fázi přetvoření vede ke vzniku tvárného lomu. Zužování se dá pozorovat například při zkoušce tahem při dosažení maximální síly. Vlastní zužování se ještě rozděluje na tzv. difúzní a lokální. Pod pojmem ztráta stability je pak myšlen jev, kdy se rovnoměrné přetvoření

stává nestabilním, tj. i malé dodatečné změny v tomto stavu již vedou ke změně původní deformační stopy.

Při využití početních metod lze křivky mezních přetvoření získat na základě teoretického rozboru vlastností plechů. Tyto metody se jeví jako rychlé a poměrně jednoduché. Hodnoty mezních přetvoření jsou vypočteny, při zavedení určitých zjednodušujících předpokladů, pomocí vztahů odvozených z teorie plasticky anizotropního tělesa. Jsou vyjádřeny jako funkce materiálových charakteristik zjišťovaných zkouškou tahem a stavu napjatosti, přičemž se vychází z různých definic mezního stavu.

V současné době patří mezi nejrozšířenější následující matematické modely pro výpočet mezních přetvoření:

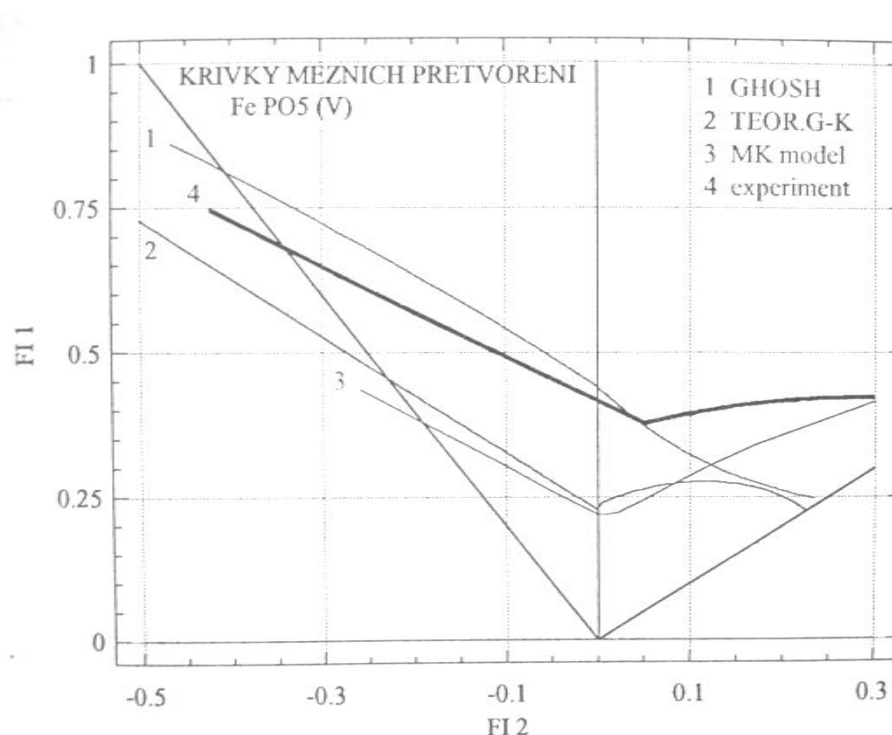
1. Metoda spočívající na matematickém určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti (Teoretické Goodwin-Keelerovy diagramy mezních přetvoření).
2. Metoda vycházející z faktu, že plech obsahuje výchozí nehomogenity zapříčiňující vznik lokálních ztenčení, jež vedou k porušení (Metoda stanovení křivek mezních přetvoření dle MK teorie).
3. Metoda vycházející z existence vměstků v plechu, kolem nichž se tvoří dutiny, jejichž postupným spojením dojde k porušení (Metoda stanovení křivek mezních přetvoření dle Ghoshe).

Základy jednotlivých přístupů jsou uvedeny v [1].

2.2.3 Porovnání s experimentem

Na obr. 2.2.3.1 je vidět porovnání křivek mezních přetvoření získaných početně oproti křivce získané experimentálně. Je zřejmé, že charakter průběhu je obdobný, značně se však liší jejich vzájemná poloha v DMP. Tato

odlišnost plyne především z různě definovaných stavů v jednotlivých případech. Nejnáročnější ve vztahu k funkční spolehlivosti výlisku je kritérium ztráty stability na mezi pevnosti (na obr. 2.2.3.1 křivka označena č. 2). Z pracovního diagramu zkoušky tahem pro hlubokotažný materiál je patrný velmi pozvolný pokles síly po dosažení meze pevnosti, což vede k myšlence více využít zásobu plastičnosti materiálu a „posunout“ mezní stav až za mez pevnosti. V takovém případě je zvolen za mezní stav vznik tvárného lomu a tím je také dosahováno maximálního využití plastičnosti plechu (na obr. 2.2.3.1 křivka označena č. 1). Oba uvedené případy mezních stavů představují obecně krajní meze, z čehož plyne možnost volit mezní stav mezi nimi (na obr. 2.2.3.1 křivka označena č. 3). I tato křivka mezních přetvoření se liší svou polohou i průběhem od experimentem stanovených hodnot. Je to způsobeno tím, že se stále nedaří přesněji podchytit matematickým modelem míru působení mnoha faktorů, které ovlivňují dosaženou hodnotu mezního stavu.



Obr. 2.2.3.1 KMP získané uvedenými početními metodami v porovnání s KMP určenou experimentálně [1]

2.2.4 Vliv materiálových charakteristik na polohu KMP

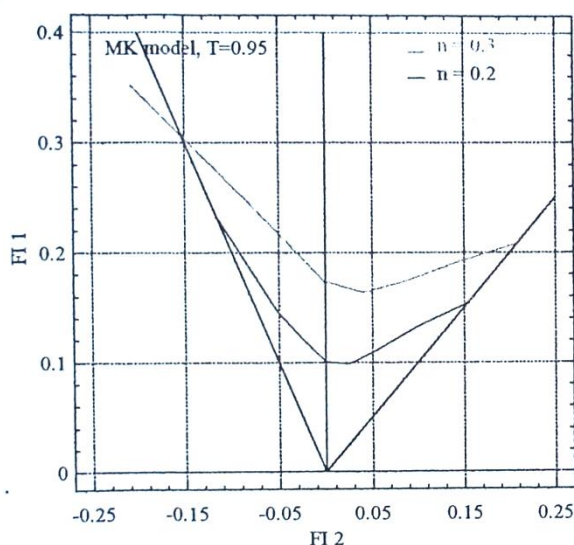
I srovnání vypočtených křivek vycházejících ze stejného kritéria mezního stavu, je velice problematické v důsledku určité nejednotnosti metodik určování základních materiálových charakteristik. Mezi nejdůležitější materiálové charakteristiky využívané pro výpočet mezních přetvoření patří zejména:

- materiálová charakteristika „ n “, která je obvykle označována jako exponent deformačního zpevnění,
- poměr plastických přetvoření, který je označován jako normálová anizotropie „ r “,
- lomová přetvoření $\varphi_{2L,1L}$,
- koeficient monotónního zpevnění „ C “ [MPa]

a jejich plošné anizotropie. Vedle těchto základních veličin se objevují i další jako například:

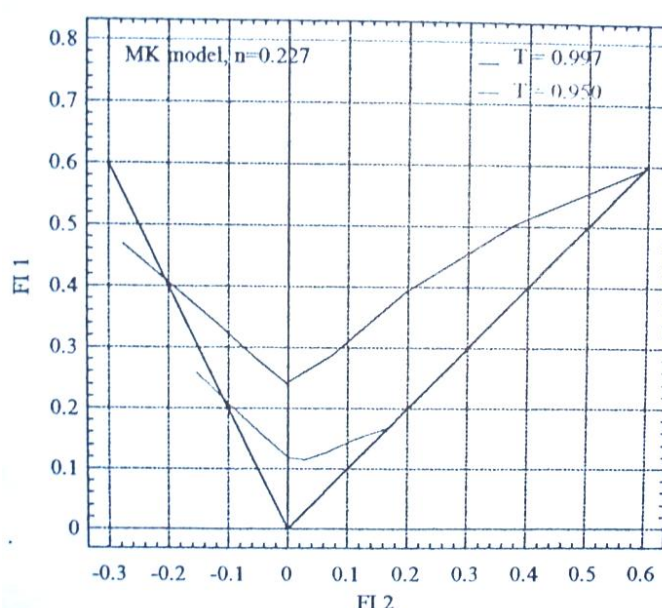
- exponent „ m “ popisující citlivost materiálu na rychlost deformace,
- parametr zeslabení „ T “ popisující rozdíly v tloušťce plechu,

a řada dalších.



Obr. 2.2.4.1 Vliv exponentu zpevnění „ n “ na KMP dle MK.teorie [1]

Na obr. 2.2.4.1 je vidět, že s rostoucí hodnotou „n“ se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . Stejně je tomu v případě normálové anizotropie. S rostoucí hodnotou „r“ se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . Vliv nehomogenity materiálu vyjádřený parametrem zeslabení „T“ je takový, že s rostoucí homogenitou plechu se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 , jak je vidět z obr 2.2.4.2.



Obr. 2.2.4.2 Vliv parametru zeslabení „T“ na KMP dle MK-teorie [1]

2.2.5 DMP – experimentální způsoby

Abychom mohli získat diagram mezních přetvoření, musíme získat množství hodnot mezních přetvoření, vždy dvojic [φ_{2K} , φ_{1K}], v rozsahu $m_\varphi \in < -0,5 ; 1 >$ při daném kritériu mezního stavu. Původním postupem, který uplatňoval Keeler, bylo zjišťování mezních přetvoření na různých typech výlisků. Získání KMP bylo značně náročné, pracné a zdlouhavé.



Mnohem jednodušší je experimentální modelování stavů m_σ či m_φ v laboratorních podmínkách použitím některého z následujících postupů:

- Zkouška tahem tyčí opatřených vruby různých rozměrů,
- Zkouška hydraulická s kruhovou či eliptickými tažnicemi,
- Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů,
- Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře,
- Zkouška vypínání zkušebních těles s vystřiženými kruhovými segmenty proměnného poloměru,
- Zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem.

Jednotlivé postupy se navzájem liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních vzorků a úplností výsledků, které poskytují. V nejdůležitějších parametrech se posledně uvedená metoda ukázala jako nejprogresivnější. Proto bude použita při našem experimentu.

2.3 OPTICKÉ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY [4], [5]

Základem měřících optických systémů je princip fotogrammetrie. Pod pojmem fotogrammetrie rozumíme všeobecné metody, které jsou schopny získat z jednoho či více snímků nepřímou metodou informace o tvaru a poloze objektu, který je na snímku zachycen. Fotogrammetrii je tedy možné uplatnit v zásadě všude, kde lze požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit. Fotogrammetrie se dělí podle různých kritérií jako např. podle počtu snímků pořízených současně, podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků nebo podle časové dostupnosti snímků a další. Jako příklad je zde uvedeno rozdělení podle časové dostupnosti snímků, které se dělí na:

- real time - snímání a vyhodnocení jednoho snímku v reálném čase v průběhu zadaného procesu. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb) objektu,
- offline - sekvenční snímkování, časově nebo prostorově oddělené vyhodnocení,
- online - simultánní snímání více snímků a bezprostřední vyhodnocení této skupiny snímků. Kamery většinou přímo připojeny k počítači.

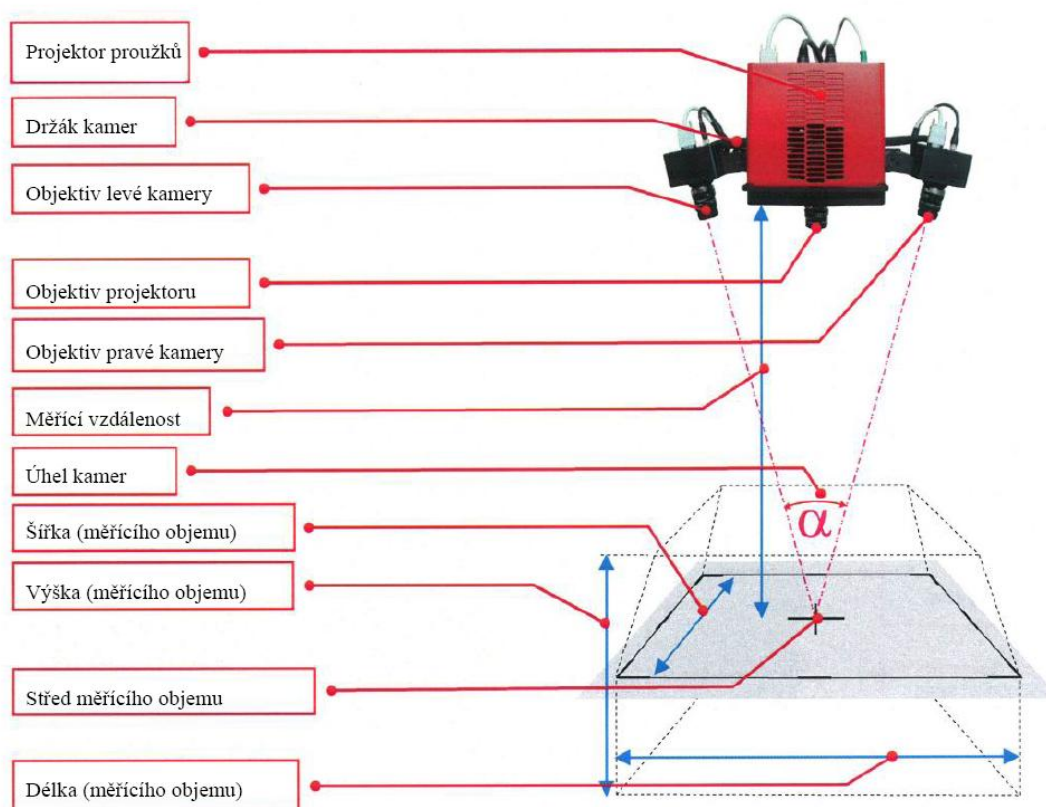
Hlavní body použití optických měřících systémů jsou 3D digitalizace, 3D technika pro měření souřadnic, analýza deformace a kvalitativní kontrola. Tyto systémy se používají ve vývoji výrobku a zajištění kvality, stejně jako při zkoušce materiálu nebo součástek. Z firem, které se zabývají touto problematikou, si získal vedoucí pozici na trhu GOM mbH, a to díky intenzivní spolupráci s automobilovým průmyslem, kdy přenesl požadavky z průmyslu do produktů. GOM mbH byl založen v roce 1990 jako vedlejší produkt Technické univerzity v Braunschweigu a vyvíjí vysoce kvalitní optické měřící systémy. Pomocí 3D scanneru ATOS se dají generovat vysoce přesná plošná data. Naproti tomu systém TRITOP dodává přesná bodová

data měřeného objektu. Systémy ARAMIS, ARGUS a PONTOS slouží k deformační resp. pohybové analýze. Jednotlivé systémy budou charakterizovány v následujících kapitolách.

2.3.1 Měřicí systém ATOS [6]

ATOS je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Využití nachází v oblastech CAD, CAM a FEM kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem. Pomocí digitalizačního systému ATOS (Advanced Topometric Sensor), mohou být objekty změřeny rychle a s vysokou přesností. Systém ATOS je založen na triangulačním principu což znamená, že jednotka senzoru promítá na měřený objekt různé vzory proužků, které jsou snímány dvěma kamerami (obr. 2.3.1.1). Každý záběr je snímán s rozlišením 800 000 bodů. Pro kompletní digitalizaci objektu je třeba provést několik záběrů z různých úhlů. Na základě referenčních bodů (kruhové značky), které jsou aplikovány přímo na objekt, měřicí desku nebo rámeček, ATOS transformuje tyto jednotlivé záběry plně automaticky do společného globálního souřadného systému. Nasnímaná data jsou poté uživatelem upravena v ATOS software. Výstupy je možné exportovat ve formátu mraku bodů, řezů nebo STL.

ATOS systém je samostatný systém, který se skládá ze senzoru zahrnujícího dvě kamery a projektor, kontrolní jednotky hlavy senzoru a vysokovýkonného PC s operačním systémem GOM linux. Jako příslušenství je používán robustní stativ umožňující pohyb senzoru v pěti osách, který zajišťuje stabilitu senzoru při skenování. K dispozici jsou dva měřicí objemy dle velikosti snímaného objektu.



Obr. 2.3.1.1 Schéma měřicího systému ATOS [6]

Možnosti využití:

- Bezkontaktní a materiálově nezávislá 3D digitalizace libovolných objektů jako jsou součásti, modely a formy.
- Generování STL formátu nebo CAD dat
- Převod modifikací modelu do CAD
- Porovnání jmenovitých/aktuálních hodnot mezi měřeným objektem a CAD daty (CAD model, mrak bodů nebo STL data)
- Kontrola kvality, např. měření deformací, výrobních defektů, odpružení
- Ověření smontovatelnosti jednotlivých komponentů pomocí virtuální sestavy v softwaru.
- Vytvoření kontrolních dat (na základě volných ploch nebo mnohostěnů) pro výrobu nebo kopírování výrobku na NC výrobních strojích (frézka) a systémech Rapid Prototypingu.

2.3.2 Měřicí systém PONTOS [4]

PONTOS je bezkontaktní, optický, 3D měřicí systém, využívající principů stereo fotogrammetrie. Je schopen analyzovat, vyhodnotit a dokumentovat deformace objektu, pohyby těles a dynamické chování měřených objektů. Pracuje na platformě softwaru TRITOP. PONTOS umožňuje precizní dynamickou detekci polohy libovolného počtu referenčních bodů, které jsou aplikovány na měřený objekt. Systém digitálních kamer snímá změnu polohy bodů v průběhu zatížení a software potom vyhodnotí a porovná 3D souřadnice jednotlivých bodů. Ukázka dvojice kamer systému PONTOS je na obr. 2.3.2.1.



Obr. 2.3.2.1 Dvojice kamer systému PONTOS [4]

Systém využívá reflexních měřících bodů, a to pro lepší viditelnost při vysokých frekvencích snímání, kdy se úměrně zkracuje čas otevření závěrky kamery. Kruhově umístěný blesk zajišťuje dostatečné osvětlení v okamžiku otevření. Body mohou být samolepící nebo magnetické a jsou aplikovány na povrch objektu nebo na jeho okolí. Z pohledu identifikace bodu systémem rozeznáváme dva typy bodů (viz. obr. 2.3.2.2):

- Kódované - Tento typ bodu je systémem automaticky identifikován a je mu přiřazeno jedinečné označení. Kód je umístěn v kruhu okolo samotného bodu a odpovídá binárnímu kódování. Nevýhodou je větší plocha, kterou terčik zabírá.

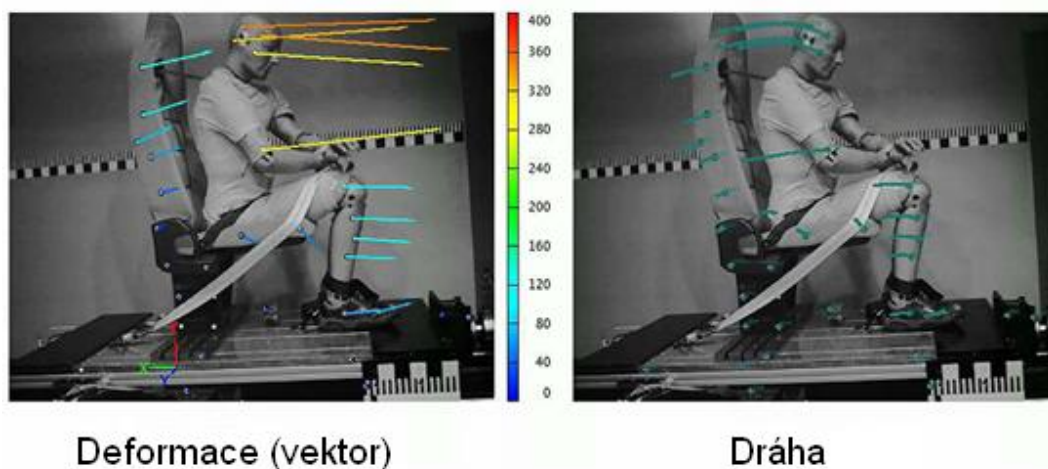
- Nekódované - Výhodou nekódovaných bodů je jejich snadná produkce a velikost plochy, kterou zabírají. Identifikace je založena na jejich poloze.



Obr. 2.3.2.2 Kódované a nekódované body [4]

Možnosti využití:

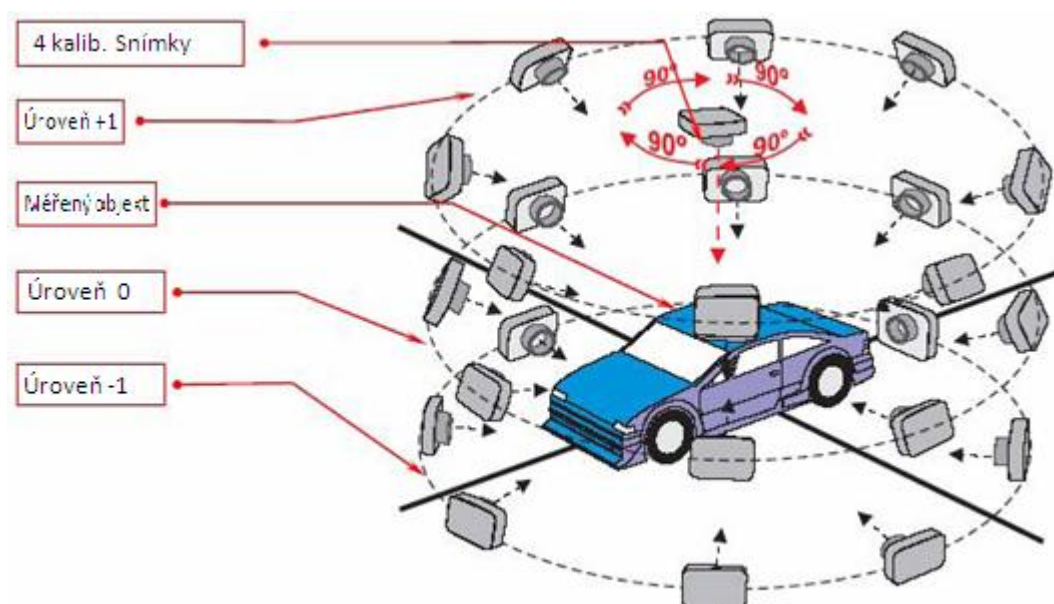
- Dynamické chování komponent
- Poloha komponent v aerodynamickém tunelu
- Deformace při aerodynamickém zatížení
- Crash testy (obr. 2.3.2.3)
- Drop testy
- Vibrační analýzy
- Verifikace simulací



Obr. 2.3.2.3 Simulovaný náraz při 25km/h [4]

2.3.3 Měřicí systém TRITOP [4]

Výše popsaný systém PONTOS plně vychází ze systému TRITOP, který svým zařazením odpovídá jednosnímkové real-time fotogrammetrii. Používá tedy jedinou kameru, kterou je měřený objekt snímán, a to postupně z několika úrovní (viz. obr. 2.3.3.1). Principem vyrovnání bloku projekčních svazků pak dochází k určení souřadnic jednotlivých bodů. Systém je schopen analyzovat statické a quasi-statické deformace a díky své vysoké mobilitě je vhodným doplňkem jak systému PONTOS, tak i jiných optických měřicích systémů na společné platformě GOM. Před samotným snímáním se neprovádí kalibrace pomocí skupiny bodů, jako je tomu u systému PONTOS.



Obr. 2.3.3.1 Snímání 3D objektu pomocí TRITOP kamery [4]

Výpočet kalibračních dat je proveden až po nasnímání celé skupiny obrázků s tím, že první čtveřice je provedena při pootočení vždy o 90° okolo optické osy fotoaparátu. Jako měřítko, které přiřazuje poměrným vzdálenostem bodů v prostoru jednotkový charakter, zde slouží takzvané měřítkové tyče (viz. obr. 2.3.3.2). Pro úspěšný výpočet prostorových souřadnic měřených bodů je nutný dostatečný počet snímků z rozdílných pozic a dostatečný překryv snímků. Tím se rozumí skutečnost, že na každém

snímku musí být zaznamenán minimální počet kódovaných bodů (min. 8), díky kterým dojde ke „svázání“ snímků (viz. obr. 2.3.3.2).



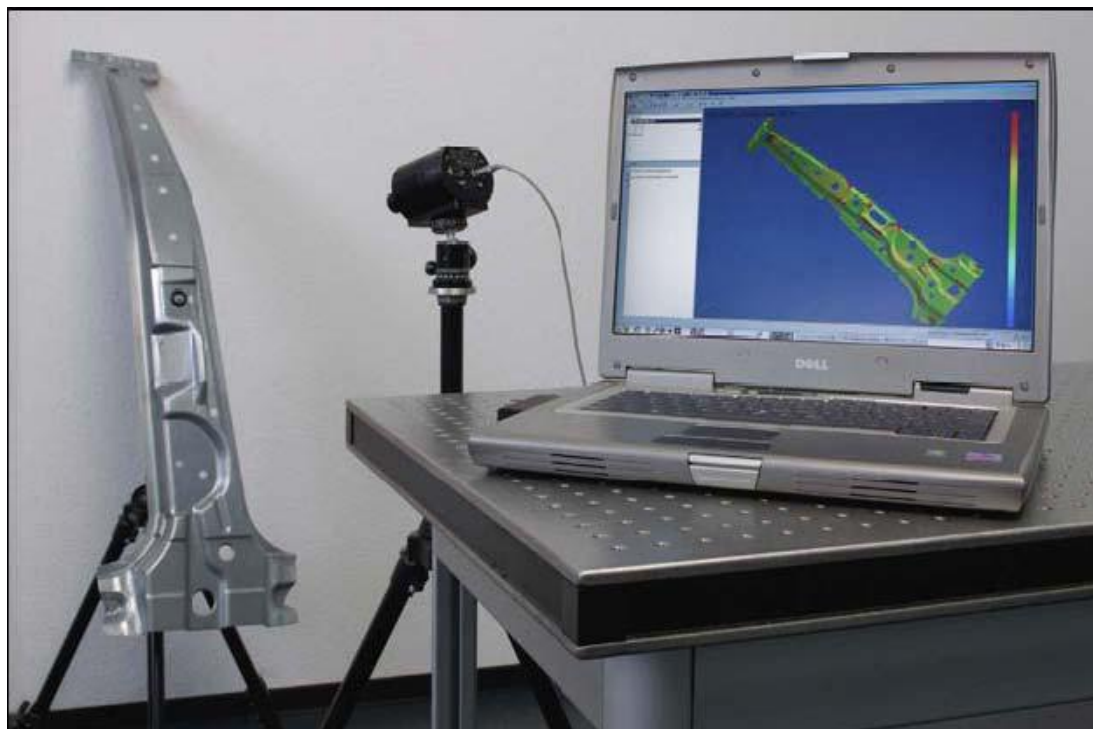
Obr. 2.3.3.2 rozložení 3D objektu při snímání [4]

Možnosti využití:

- kontrola kvality
- reverzní inženýrství
- deformační analýzy
- spolupráce se systémem ATOS pro velké objekty

2.3.4 Měřicí systém ARGUS [3], [7], [8]

Systém ARGUS je speciálně určen pro měření součástek lisovaných z plechu. Před tvářením se na povrch plechu vyleptá pravidelná mřížka bodů. Po skončení tvářením se deformovaná mřížka nasnímá CCD kamerou a zpracuje na počítači. Z výsledné deformované mřížky systém dokáže určit přesnou geometrii výrobku, změnu tloušťky plechu. Takto se může sledovat proces tvářením a mohou se najít kritická místa (viz. obr. 2.3.4.1).



Obr. 2.3.4.1 Snímání objektu pomocí systému ARGUS [3]

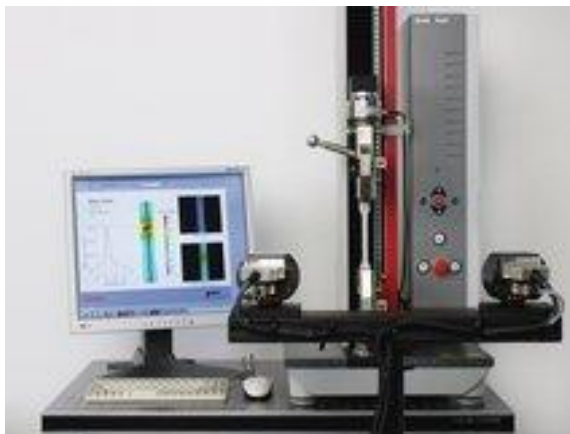
Možnosti využití:

- ověřování a optimalizace simulace tažení plechů
- optimalizace procesu tváření
- detekce oblastí s kritickou deformací
- optimalizace lisovacích nástrojů
- zkoušky materiálu

2.3.5 Měřicí systém ARAMIS [8]

ARAMIS je bezkontaktní měřicí systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky, nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo může být řízen externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). Maximální rychlost snímání může být až 8000 snímků za sekundu u systému HS. Při měření rotačních objektů se dá propojit více systémů ARAMIS do jednoho

měřicího systému. Mezi jeho přednosti patří velký rozsah měření (objekty velikosti od 1mm až do 1000mm), jednoduchá příprava povrchu (nástřík může být pravidelný i náhodný), vysoká hustota naměřených dat a mobilita.



Obr. 2.3.5.1 Měření tahové zkoušky pomocí systému ARAMIS [8]

Možnosti využití:

- dimenzování součástek
- zkoušky materiálu (viz. obr. 2.3.5.1)
- testování nových materiálů
- výpočty stability
- zkoumání materiálu v nelineárních oblastech deformace
- optimalizace procesu tváření (limitní křivka tváření FLC)
- zjišťování materiálových vlastností
- charakteristika procesu tečení
- charakteristika procesu stárnutí

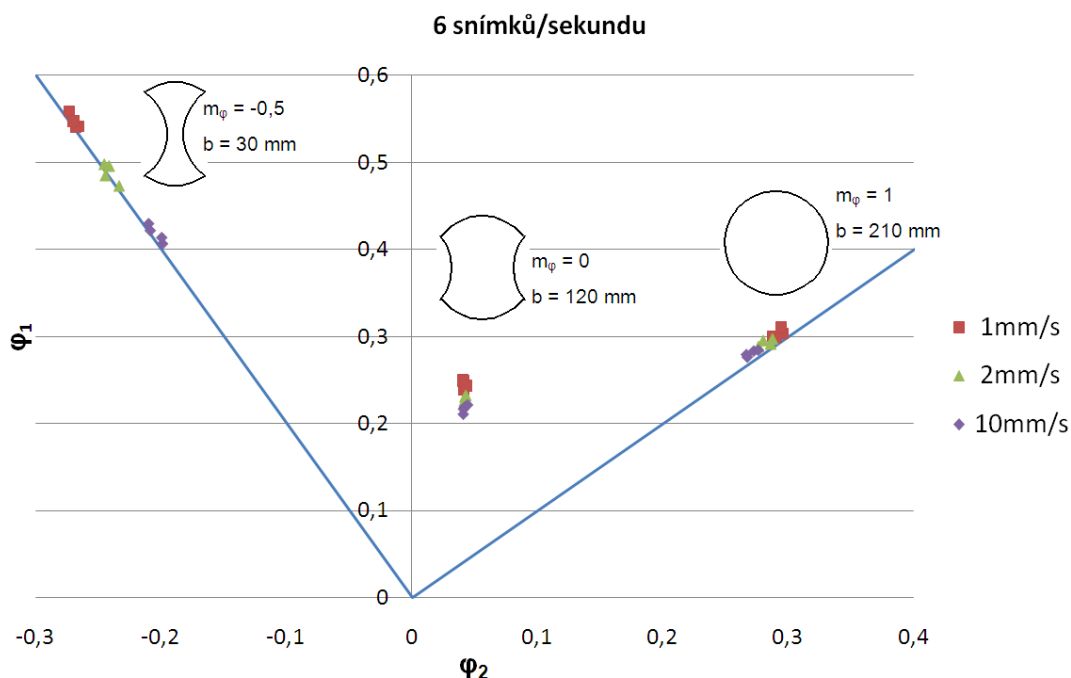
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíle experimentu

Cílem experimentu je pomocí optického systému ARAMIS stanovit vliv podmínek měření na výsledek diagramu mezních přetvoření. Sledovat zda a popřípadě jaký má vliv frekvence snímání na výsledek tohoto diagramu. Při použití standardních kamer lze na tomto optickém systému nastavit rychlost snímání v rozmezí od 1 snímku za sekundu do 6 snímků za sekundu. Pro experiment byly vybrány rychlosti 2, 4 a 6 snímků za sekundu. Rychlost pohybu tažníku je dle normy ISO/DIS 12004-2 [9] $(1,5 \pm 0,5)$ mm za sekundu. Pro měření jsou použity právě rychlosti 1 a 2 mm za sekundu, které představují rozmezí povolených rychlostí pohybu tažníku dle uvedené normy. Dále nás zajímalo, zda by šla použít vyšší rychlost tvářecího nástroje nežli je uvedena v normě, čímž by došlo k urychlení celého experimentu v praxi. Proto byla zvolena ještě rychlost zatěžování 10 mm za sekundu. Protože pokrýt celý rozsah DMP by bylo velmi náročné a zdoluhavé, byly zvoleny pouze tři deformační stopy o šířkách $b = 30\text{mm}$ ($m_\varphi = -0,5$), $b = 120\text{mm}$ ($m_\varphi = 0$) a $b = 210\text{mm}$ ($m_\varphi = 1$) jak je vidět na obr. 3.1.1, které dostatečně postačí k tomu, abychom mohli vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů na výsledek experimentu. Jak je vidět z tabulky 3.1.1 máme 27 kombinací podmínek měření, které je nutné naměřit. Pro každou podmínku jsou měřeny 4 vzorky, což znamená, že je nutné provést 108 měření.

Tabulka 3.1.1 Podmínky měření

Rychlost frekvence snímání [sním/s]	Rychlost tažníku [mm/s]	Šířka def. stopy b [mm]
2	1	30
4	2	120
6	10	210



Obr 3.1.1 Ukázka části DMP s použitými tvarovými přístřihy

Dalším cílem je stanovit deformační rychlost tvářeného materiálu pro různé stavy napjatosti a různé rychlosti tvářecího stroje.

Pro experiment byl vybrán plech s označením H 260 BD+Z 100 MB dle EN 10292 [10] o tloušťce 0,7mm podle EN 10143 [11].

3.2 Statická zkouška tahem

Základní materiálové charakteristiky testovaného materiálu byly stanoveny statickou zkouškou tahem. Zkušební tyče byly odebrány ve směrech 0°, 45°, 90° vůči směru válcování. Mechanické hodnoty pro testovaný materiál jsou stanoveny vždy ze souboru 4 vzorků.

Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s EN 10002-1 [12]. Zkušební vzorky materiálů o jmenovité tloušťce 0,7 mm byly zhotoveny stříháním s následným broušením stříhaných ploch. Rovněž metodika provedení a vyhodnocení zkoušky je v souladu s výše uvedenou normou EN 10002-1 [12].

Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 (viz. obr. 3.2.1) s použitím vyhodnocení naměřených dat pomocí softwaru

Labtest 4.2017. Tento programový systém vyhodnocuje všechny základní charakteristiky ($R_{p0,2}$, R_m , A_{80mm} , A_g).



Obr. 3.2.1 Statické trhačí zařízení TIRAtest 2300

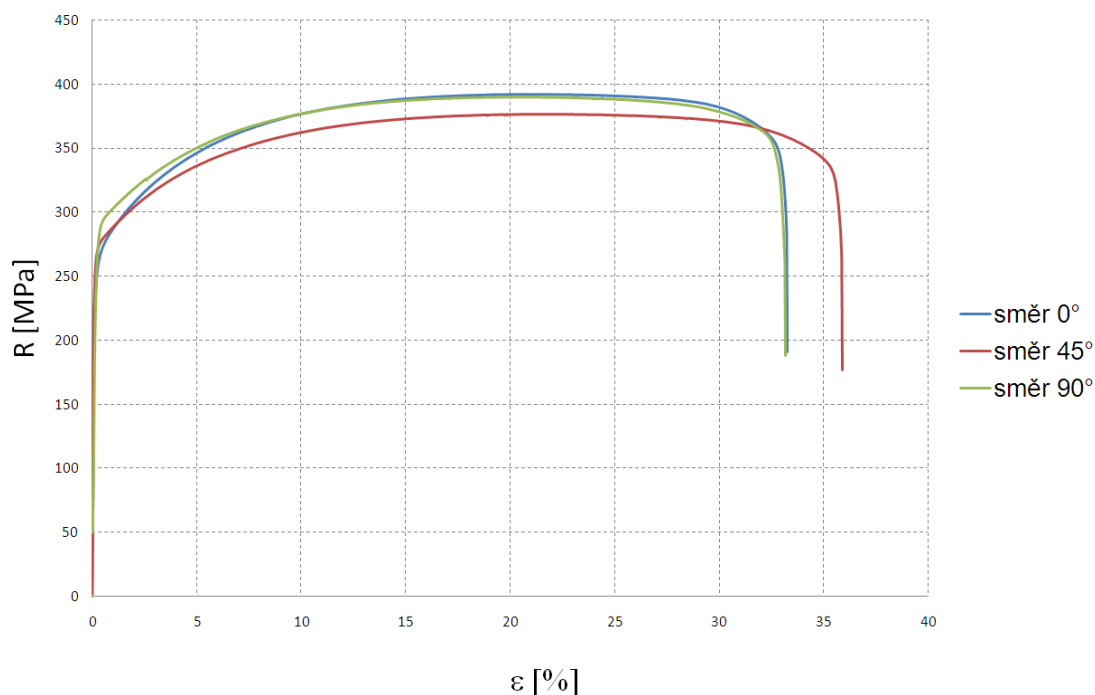
Hodnoty materiálových charakteristik zjištěných výše popsaným způsobem byly zpracovány do tabulky 3.2.1, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru s . V tabulkách je dále pro jednotlivé charakteristiky uvedena i hodnota směrově střední, která je daná vztahem 3.2.1,

$$x_s = \frac{(x_0 + 2x_{45} + x_{90})}{4} \quad (3.2.1)$$

kde: x_s – směrově střední hodnota

x_0 , x_{45} , x_{90} – zjištěné hodnoty ve směrech 0° , 45° , 90° dle směru válcování

Protokoly z uvedených měření jsou uvedeny v přílohách č.1. až č.3.
Na obr. 3.2.2 je zachycen pracovní diagram statické zkoušky tahem.



Obr. 3.2.2 Grafické znázornění statické zkoušky tahem
pro materiál H 260 BD+Z 100 MB

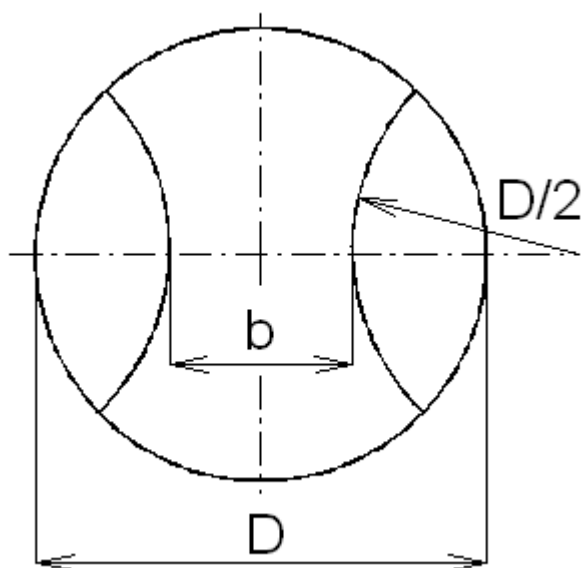
Tabulka 3.2.1 Základní materiálové charakteristiky materiálu

směr	$R_{p0,2}$ [MPa] s	R_m [MPa] s	A_{80mm} [%] s	A_g [%] s
0°	262,4 3,21	390,51 1,55	33,52 0,4	20,85 0,03
45°	273,43 20,1	377,64 0,92	35,57 0,82	21,42 0,57
90°	289,68 1,73	390,64 0,35	33,34 0,62	19,99 0,19
x_s	274,74	384,11	34,50	20,92

3.3 Experimentální metoda k získání diagramu mezních přetvoření pomocí optického systému ARAMIS

3.3.1 Postup

Pro zjištění diagramu mezního přetvoření experimentálním způsobem byla použita metoda vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou b (viz. obr. 3.3.1.1).



Obr. 3.3.1.1 Tvarový nástřih k modelování různých stavů přetvoření

Pro každou deformační stopu a pro každou rychlost zatěžování byly zhotoveny 4 vzorky. Z důvodu úspory času byly voleny pouze tři deformační stopy o šířkách $b = 30\text{mm}$ ($m_\varphi = -0,5$), $b = 120\text{mm}$ ($m_\varphi = 0$) a $b = 210\text{mm}$ ($m_\varphi = 1$). To by mělo postačit k zhodnocení vlivu rychlosti snímkování optickým systémem ARAMIS při stanovení DMP. Při třech různých rychlostech zatěžování a při třech frekvencích snímkování vyšlo, že bylo potřeba minimálně 108 tvarových přístřihů. Předpokládalo se, že ne všechny vzorky se povedou nasnímat, a proto bylo raději nástřiháno více vzorků. Orientace použitých vzorků pro zhotovení DMP byla volena tak, aby směr hlavní normálové deformace φ_1 byl vždy kolmo vůči směru válcování. Tvarové přístřihy byly zhotoveny pomocí střížného nástroje na výstředníkovém lisu (viz. obr. 3.3.1.2).



Obr. 3.3.1.2 Výstředníkový lis

Zkušební zařízení pro vypínání tvarových zkušebních těles se skládá ze speciálního nástroje umístěného na hydraulickém dvojčinném lisu CBA 300/63 (viz. obr. 3.3.1.3), kde nástřihy pevně sevřené v oblasti příruby jsou vypínány polokulovým tažníkem o průměru 100 mm. Ke sledování procesu plastického přetvoření slouží optický systém ARAMIS jak je vidět na obr. 3.3.1.3, který byl charakterizován v kap. 4.5.



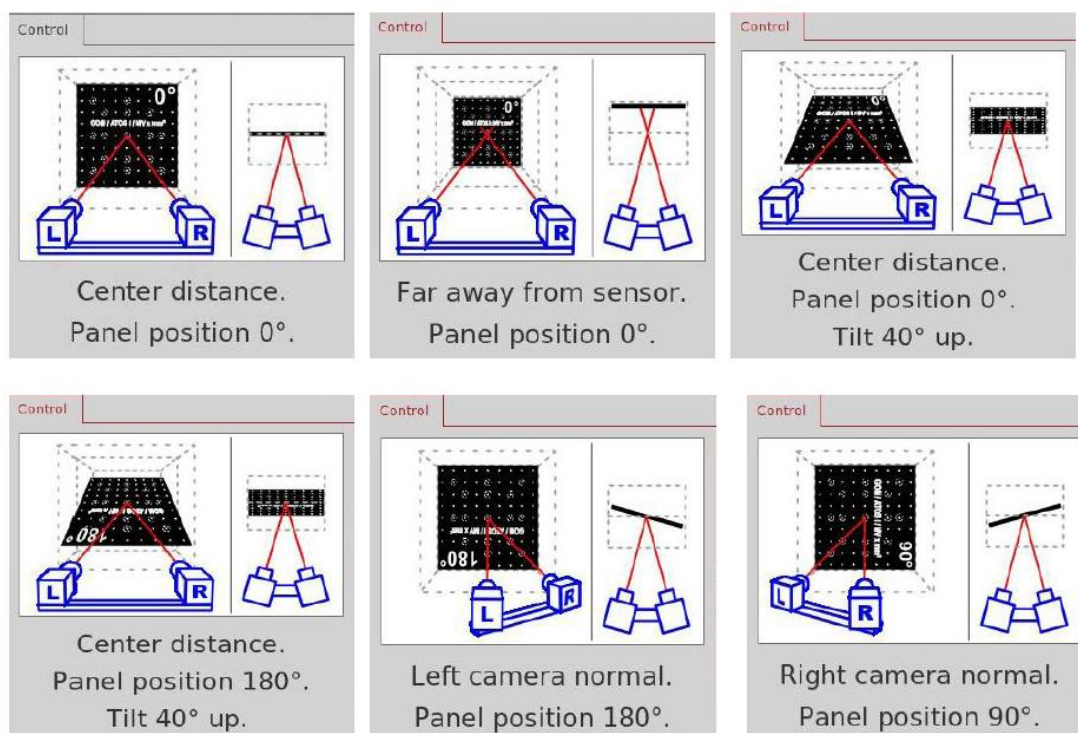
Obr. 3.3.1.3 Hydraulický dvojčinný lis CBA 300/63 spolu s optickým systémem ARAMIS

3.3.2 Příprava Optického systému ARAMIS

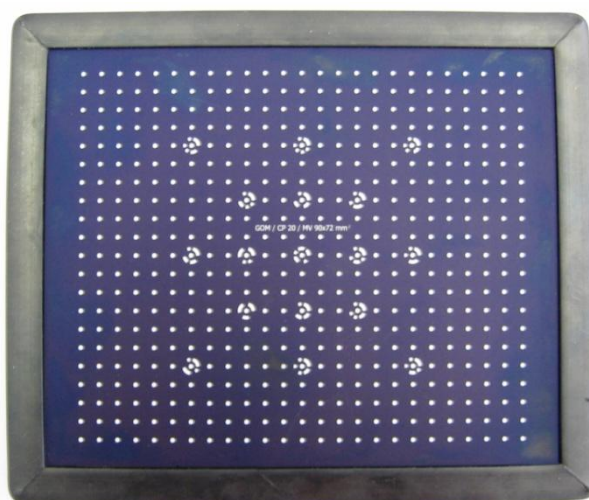
Před začátkem měření je nutno optický systém zkalibrovat. Protože v nástroji není dostatečný prostor ke kalibraci, byla provedena mimo nástroj, a až následně po kalibraci byl optický systém ARAMIS opatrně přemístěn do nástroje a připevněn k předem připraveným stojanům jak je vidět na obr. 3.3.1.3. Před kalibrací je vhodné nechat kamery zahřát po dobu 5-ti až 10-ti minut, aby kalibrace byla provedena za provozních podmínek.

Jako první krok je nutné kamery zaostřit na požadovanou vzdálenost a nastavit clony v závislosti na zvoleném světelném zdroji, aby bylo možno snímání objektu následně nechat spočítat pomocí softwaru. Dále následuje vlastní kalibrace dle pokynů softwaru (viz. obr. 3.3.2.1), ke které se využívá kalibrační deska. K dispozici máme dvě kalibrační desky podle snímaného

objemu. Nám stačila menší z nich o kalibračních rozměrech 90x72 mm² (viz. obr. 3.3.2.2) díky které lze snímat objekt v hloubce 450 mm. Na obr. 3.3.2.3 je vidět kalibrační protokol, kde jsou vidět dosažené hodnoty kalibrace.



Obr. 3.3.2.1 Ukázka některých kroků kalibrace



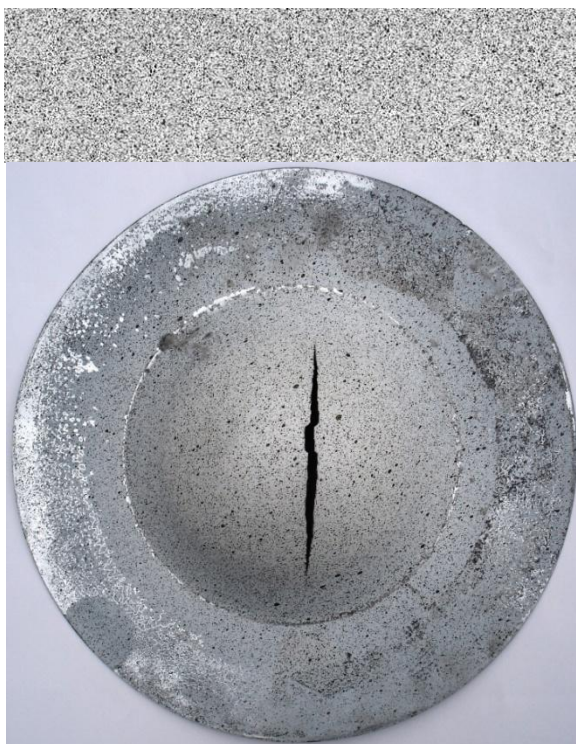
Obr. 3.3.2.2 Kalibrační deska

Actual Calibration Info	
General	
Calibration date	Mon Mar 23 15:12:05 2009
Calibration object	
Object type	Panel (coded)
Name	Calibration panel
Calibration scale	Distance 1: 83.157 mm
	Distance 2: 83.160 mm
Certification temperature	20.0 °C
Expansion coefficient	$4.00 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Measurement Temperature	20.0 °C
Calibration settings	
Camera lenses	20.00 mm
Results	
Calibration deviation	0.028 pixels
Scale deviation	0.001 mm
Camera angle	25.5°
Angle variance	-36.5 / 33.5°
Height variance	55 mm
Measuring volume	135 / 105 / 85 mm

Obr. 3.3.2.3 Kalibrační protokol

3.3.3 Příprava vzorků

Jak již bylo popsáno výše, nejdříve byly zhotoveny tvarové přístřihy. V dalším kroku byly přístřihy odmaštěny a pomocí nejprve bílého a potom černého akrylového spreje byl nanesen nepravidelný (náhodný) rastr, který se deformuje zároveň s tvářeným vzorkem. Ukázka takového rastru je na obr. 3.3.3.1, kde je vidět jak předloha, tak námi nastříkaný vzorek. Po zaschnutí spreje následuje vlastní proces tváření, který by měl proběhnout zhruba do 10 minut od nastříkání, protože po delší době by při tažení tvarového přístřihu mohlo dojít k odlupování barvy, a tudíž by byly výsledky měření nepřesné.

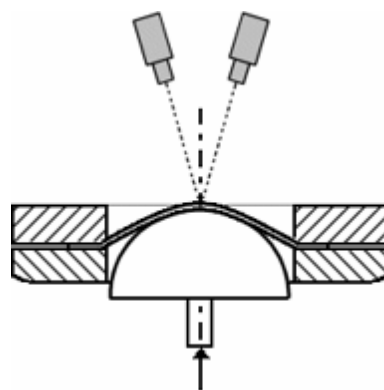


Obr. 3.3.3.1 Ukázka náhodně nastříkaného rastru v porovnání s předlohou

3.3.4 Vlastní měření

Poté, co byly připraveny přístřihy, jsme mohli začít s vypínáním vzorků na hydraulickém lisu CBA 300/63 (viz. Obr. 3.3.1.3). Rychlosti tvářecího nástroje byly zvoleny 1 mm/s a 2 mm/s, které odpovídají normě ISO/DIS 12004-2. Navíc byla zvolena ještě třetí rychlost 10 mm/s, abychom zjistili, zda je nutné dodržet tuto normu.

Optický systém ARAMIS umožňuje volit frekvenci snímání dat v rozmezí od 1 snímku/s do 6 snímků/s. V našem případě byly zvoleny tři frekvence snímání dat a to 2 snímky/s, 4 snímky/s a 6 snímků/s. Vzorek je snímán automaticky pomocí dvou kamer s CCD čipem a nasnímané fotky se ukládají do paměti počítače. Zjednodušené schéma snímání je vidět na obr. 3.3.4.1. Ze snímků jsou pomocí tzv. „Image processingu“ vypočteny 3D souřadnice bodů rastru. Porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá 3D posuvy, tvar deformovaného objektu a 3D deformace.



Obr. 3.3.4.1 Schéma snímání dat pomocí optického systému ARAMIS

Při nízkých rychlostech tváření a veliké frekvenci snímkování bychom dostali zbytečně velké množství snímků, na které by jednak nemusela stačit operační paměť počítače a jednak numerický výpočet softwarem by trval zbytečně dlouho a výsledky by zabraly velké množství dat na pevném disku. Z tohoto důvodu byla nastavena frekvence snímkování tak, aby zpočátku tvářecího procesu systém snímkoval s frekvencí 1 snímku/s a až několik sekund před okamžikem porušení snímal s frekvencí, která byla právě potřeba k experimentu. To postačí k tomu, abychom zjistili, zda má vliv frekvence snímkování na výsledný diagram mezních přetvoření, protože výsledné deformace φ_1 , φ_2 budou zjišťovány právě z posledních snímků pořízených před vznikem trhliny.

3.3.5 Volba osvětlení

V průběhu měření se ukázalo jako největší problém nasvítit snímáný objekt tak, aby software byl schopný z naměřených dat vypočítat námi požadované výsledky.

Nejprve jsme se pokoušeli nasvítit objekt pomocí LED žárovky GU10-10W-CWT-120D (viz. obr. 3.3.5.1), ale světlo bylo příliš slabé na to, aby software byl schopný nasnímaná data spočítat.



Obr. 3.3.5.1 LED žárovka

Dále jsme měli k dispozici halogenové světlo KAISER videolight 4 o výkonu 2x1000 W, ale přímo se nepodařilo vzorek v nástroji nasvítit tak, aby dopadající světlo bylo rovnoměrné. Z tohoto důvodu jsme zvolili nasvícení přes zrcadlo umístěné v nástroji jak je vidět na obr. 3.3.5.2 resp. obr. 3.3.5.3. Jak se nakonec ukázalo, tak ani tento způsob osvětlení nebyl vhodný, protože když začal tažník vyjíždět směrem nahoru, tak se světlo začalo v určitém okamžiku odrážet přímo do objektivů obou kamer. To vedlo k tomu, že obraz byl přepálený a proto nemohl software ani v tomto případě vypočítat deformace vzorku.

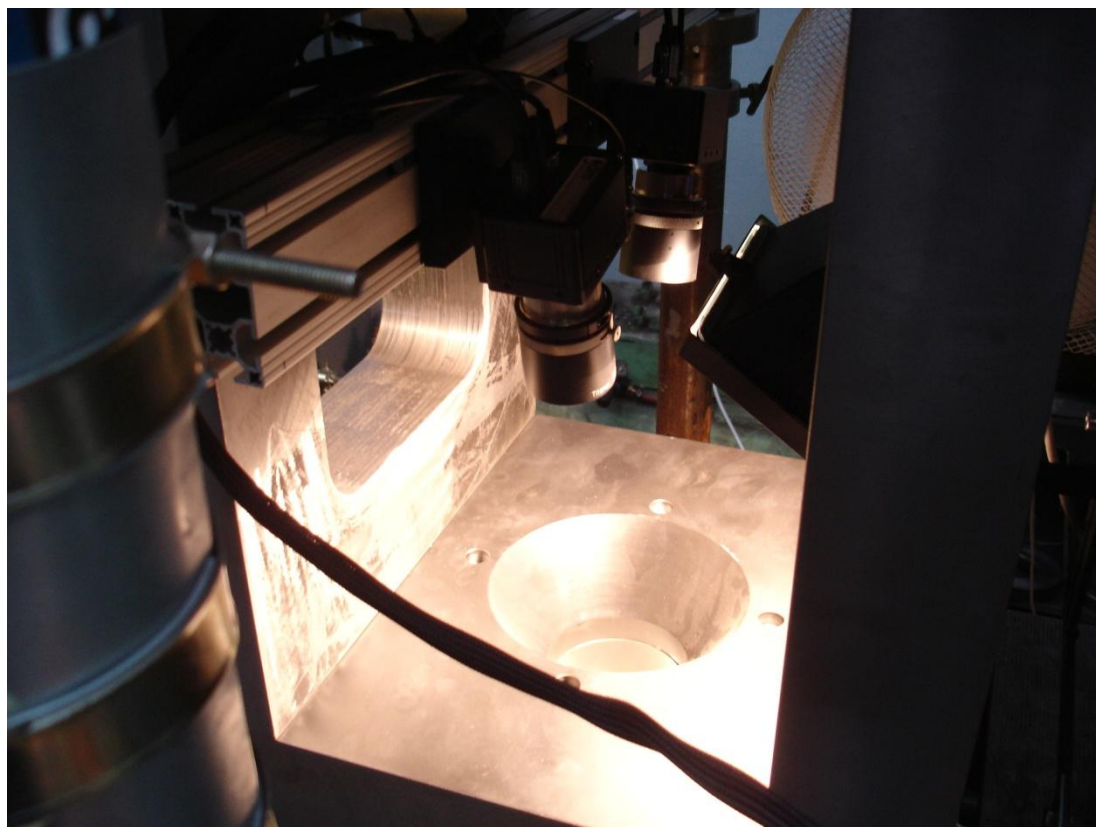


Obr. 3.3.5.2 Nasvícení zkušebního vzorku přes zrcadlo (pohled z boku)



Obr. 3.3.5.3 Nasvícení zkušebního vzorku přes zrcadlo (pohled halogenu)

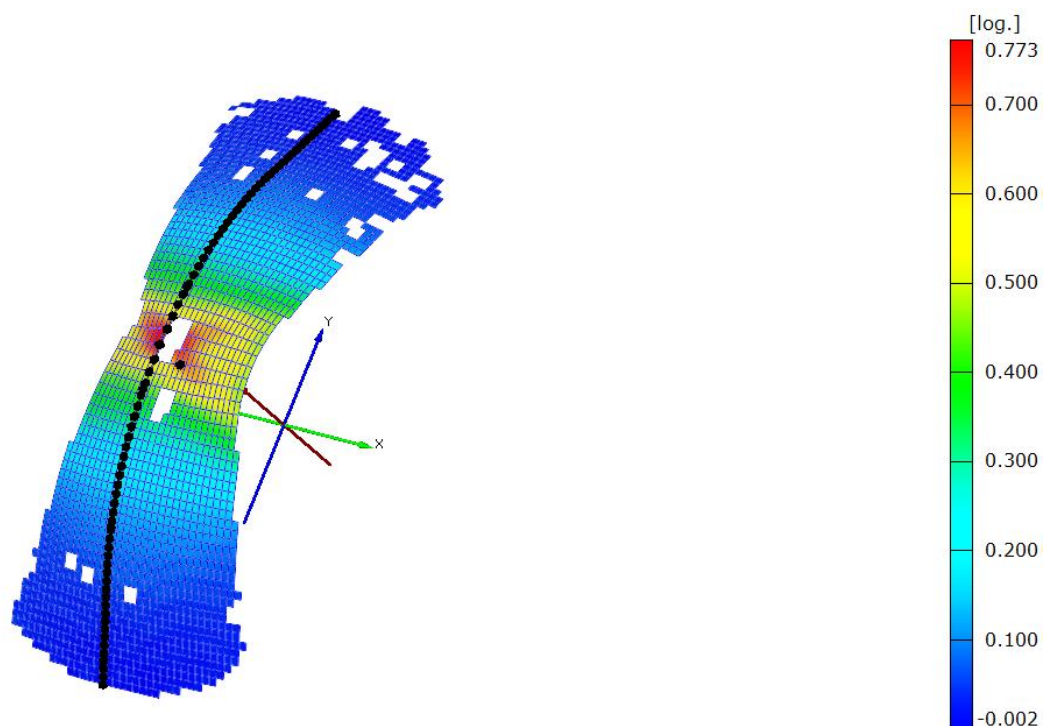
Nakonec nezbylo nic jiného než nechat do nástroje vyfrézovat z boku díry a umístit zde halogenové světlo KANLUX JEN CE-82 o výkonu 500 W (viz. obr. 3.3.5.4) To zajistilo nejen rovnoměrné osvětlení, ale také to, že při vyjíždění tažníku směrem nahoru se paprsky světla neodrážely přímo do kamer, protože nebyly v jedné ose, jako tomu bylo ve variantě se zrcadlem.



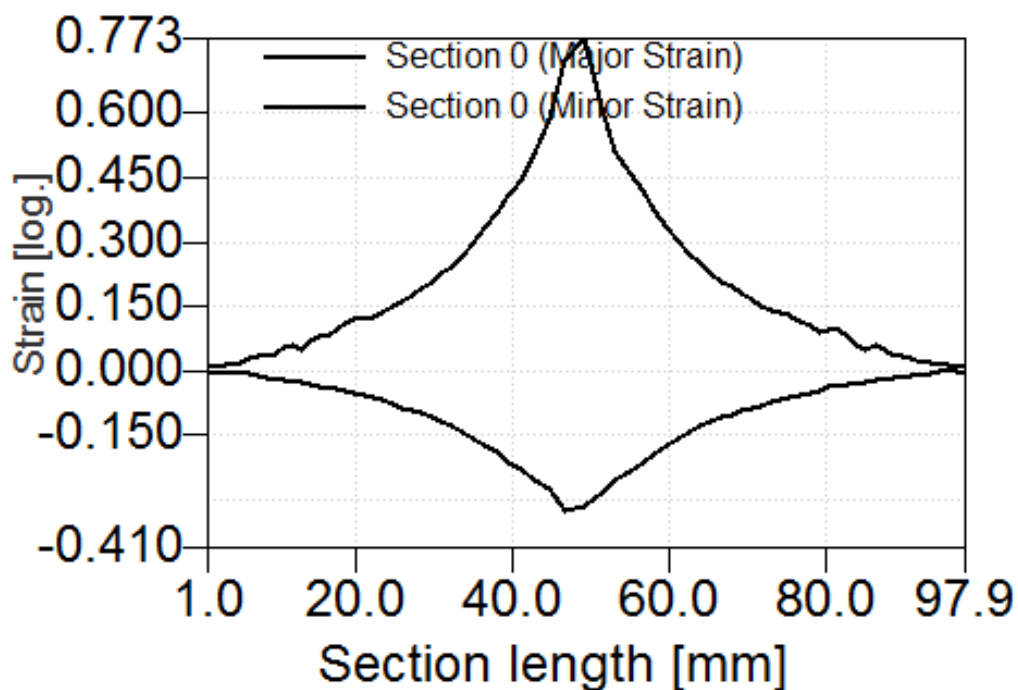
Obr. 3.3.5.4 Finální řešení osvětlení zkušební vzorku v nástroji

3.3.6 Způsob získání mezního přetvoření φ_1 , φ_2

Poté, co byly naměřeny všechny tři deformační stopy pro všechny kombinace vybraných frekvencí snímkování a rychlostí tváření, následovalo propočítání dat pomocí softwaru. Pro každý pořízený snímek je vypočítána deformace na povrchu tvářeného vzorku. Snímání bylo prováděno vždy do vzniku trhliny na zkušebním vzorku. První snímek s viditelnou trhlinou byl brán jako okamžik ukončení zkoušky. Předcházející snímek byl použit pro výpočet mezního stavu, kde byl proveden podélný řez (viz. obr. 3.3.6.1). Z tohoto řezu jsme získali rozložení hlavní deformace φ_1 a vedlejší deformace φ_2 (viz. obr. 3.3.6.2) na vzorku.



Obr. 3.3.6.1 Podélný řež



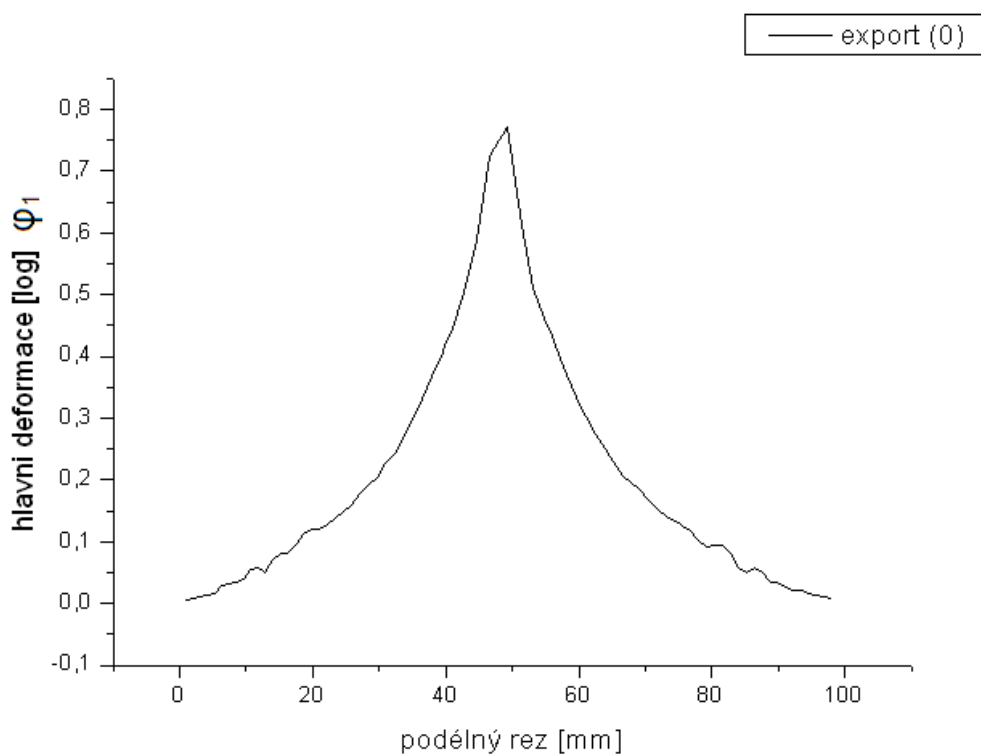
Obr. 3.3.6.2 Rozložení hlavní deformace φ_1 a vedlejší deformace φ_2

Ze získaného průběhu deformace (viz. obr. 3.3.6.2) je nutné zjistit mezní deformace φ_1 , φ_2 , které budou vynášeny do DMP. Postup získání mezních deformací upravuje norma ISO/DIS 12004-2 [9]. Pro vyhodnocení

byl použit program OriginPro 7.5. Postup vyhodnocení je patrný z následujících bodů, které jsou shodné jak pro výpočet mezní deformace φ_1 , tak pro deformaci φ_2 .

1) Import dat do OriginPro 7.5

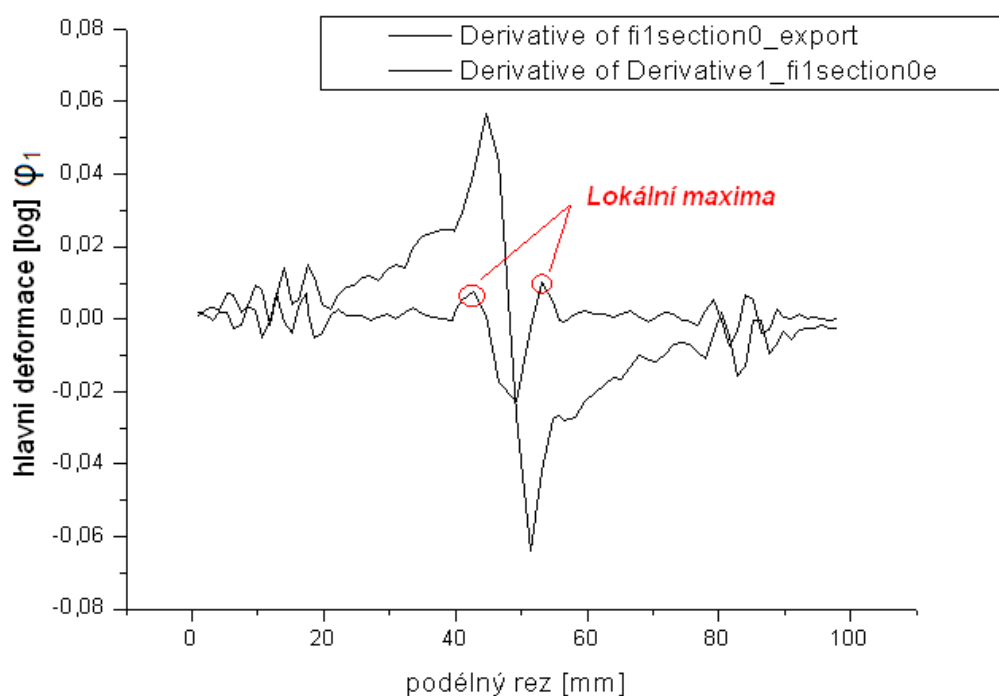
Zde došlo k importování dat do OriginPro 7.5, kde došlo k sestrojení grafu, který zobrazuje rozložení deformace φ_1 (viz. obr. 3.3.6.3)



Obr. 3.3.6.3 Průběh deformace φ_1 v programu OriginPro 7.5

2) Zjištění lokálních maxim na křivce

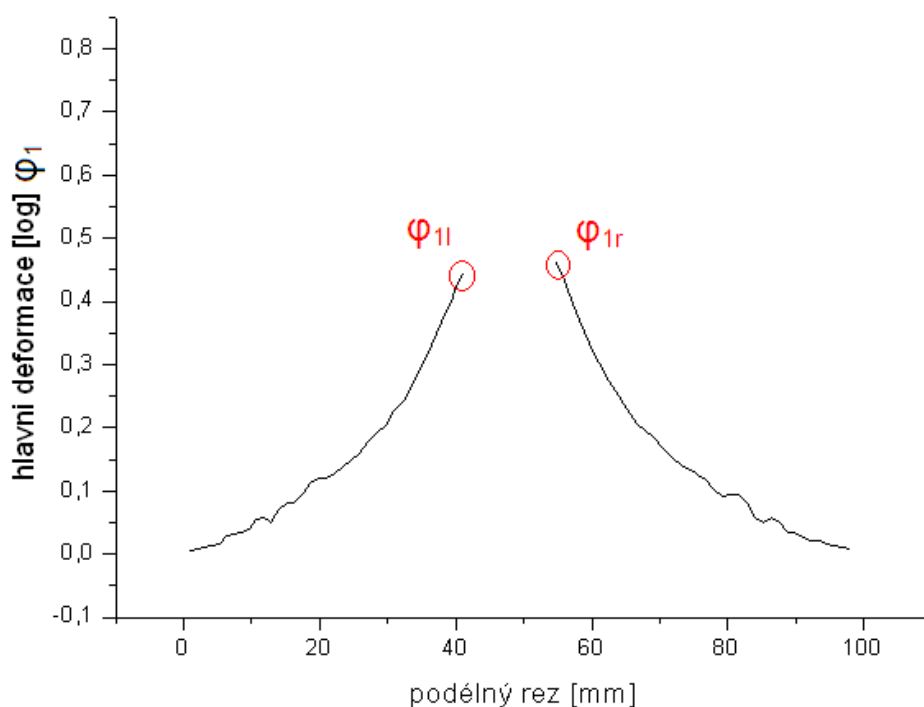
Abychom získali lokální maxima, bylo nutné původní křivku numericky 2x derivovat (viz. obr. 3.3.6.4). Tyto lokální maxima určují na křivce (viz. obr. 3.3.6.3) body, které nebudou brány do výpočtu.



Obr. 3.3.6.4 Průběh první a druhé derivace

3) Oříznutí podle lokálních maxim

Na obr. 3.3.6.5 je vidět původní křivka, oříznutá dle lokálních maxim druhé derivace a označení vnitřních bodů, potřebných k dalšímu kroku



Obr. 3.3.6.5 Oříznutí podle lokálních maxim druhé derivace

4) Výpočet bodů, které zůstanou k finálnímu výpočtu

V tomto kroku se podle vzorců 3.3.6.1 až 3.3.6.3 vypočítá, kolik bodů zůstane z křivky na každé straně, a podle toho dojde k dalšímu oříznutí křivky z vnějších stran jak je vidět na obr. 3.3.6.6.

$$w = 10 * \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right) \quad (3.3.6.1)$$

$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} * (\varphi_{2l} + \varphi_{2r}) \quad (3.3.6.2)$$

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} * (\varphi_{1l} + \varphi_{1r}) \quad (3.3.6.3)$$

kde: w - je počet bodů,

φ_{2l} - je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_2 ,

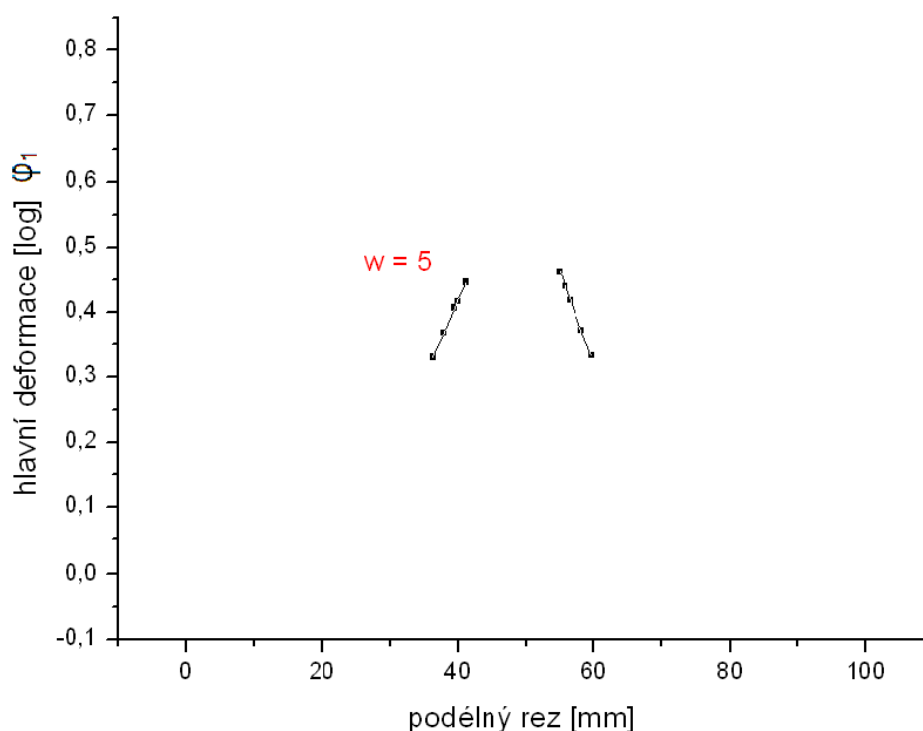
φ_{2r} - je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_2 ,

φ_{1l} - je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_1 ,

φ_{1r} - je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_1 ,

φ_{2m} - je průměrná hodnota krajních bodů φ_2 ,

φ_{1m} - je průměrná hodnota krajních bodů φ_1 .



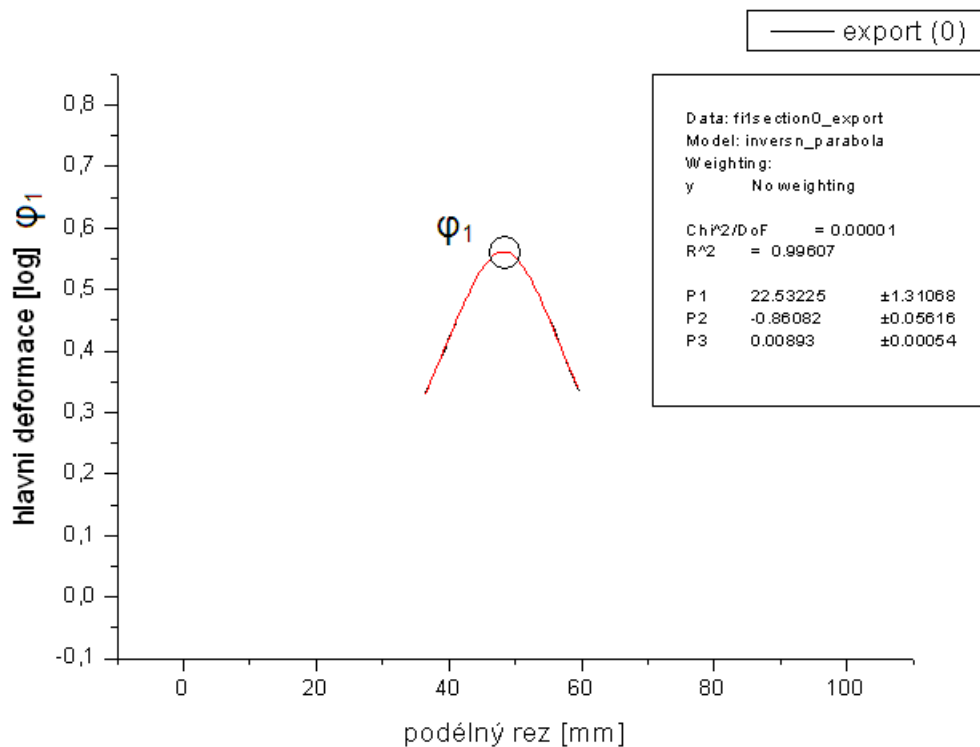
Obr. 3.3.6.6 Oříznutí podle vzorce 5.3.6.1

5) Proložení inverzní parabolou

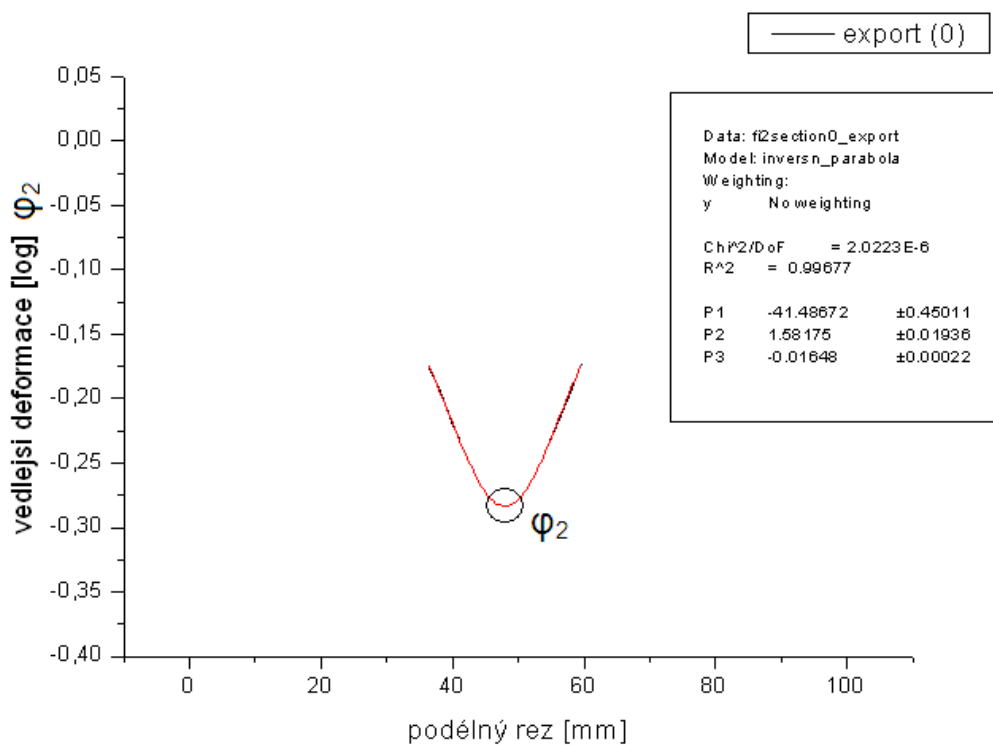
Nyní se body, které zůstaly, proloží inverzní parabola daná vztahem 3.3.6.4 a odečte se její maximum, popřípadě minimum, na ose deformace (viz. obr. 3.3.6.7 pro ϕ_1 a obr. 3.3.6.8 pro ϕ_2) a tím získáme dvojice bodů $[\phi_2, \phi_1]$, které vyneseme do diagramu mezních přetvoření.

$$y = \frac{1}{p_3 x^2 + p_2 x + p_1} \quad (3.3.6.4)$$

kde: p_1, p_2, p_3 - jsou parametry



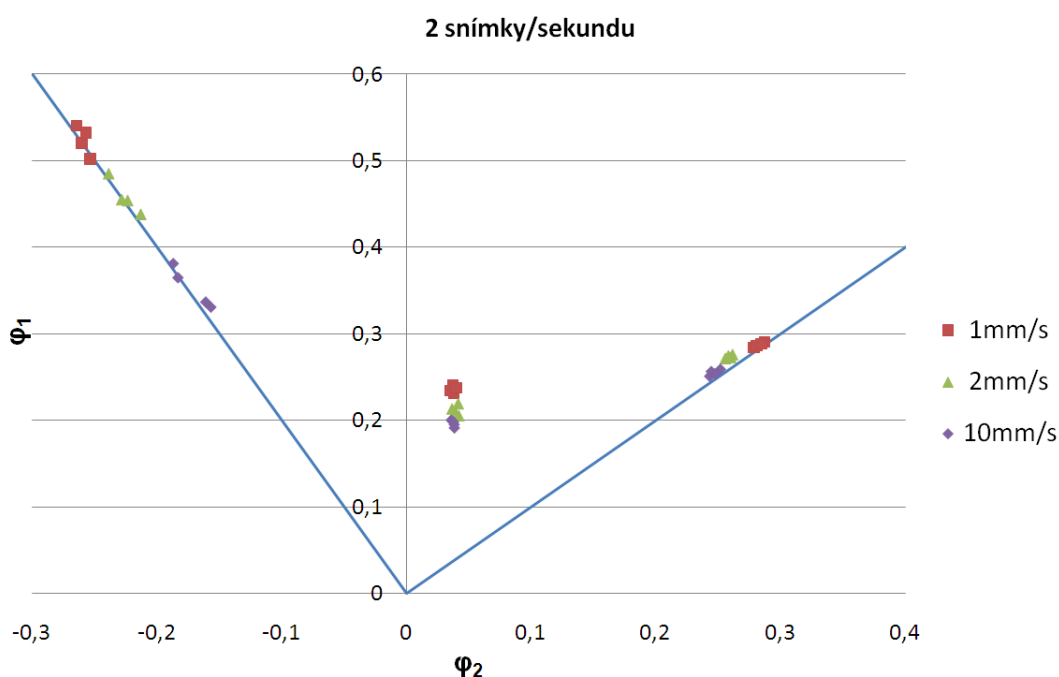
Obr. 3.3.6.7 Proložení inverzní parabolou a odečtení ϕ_1



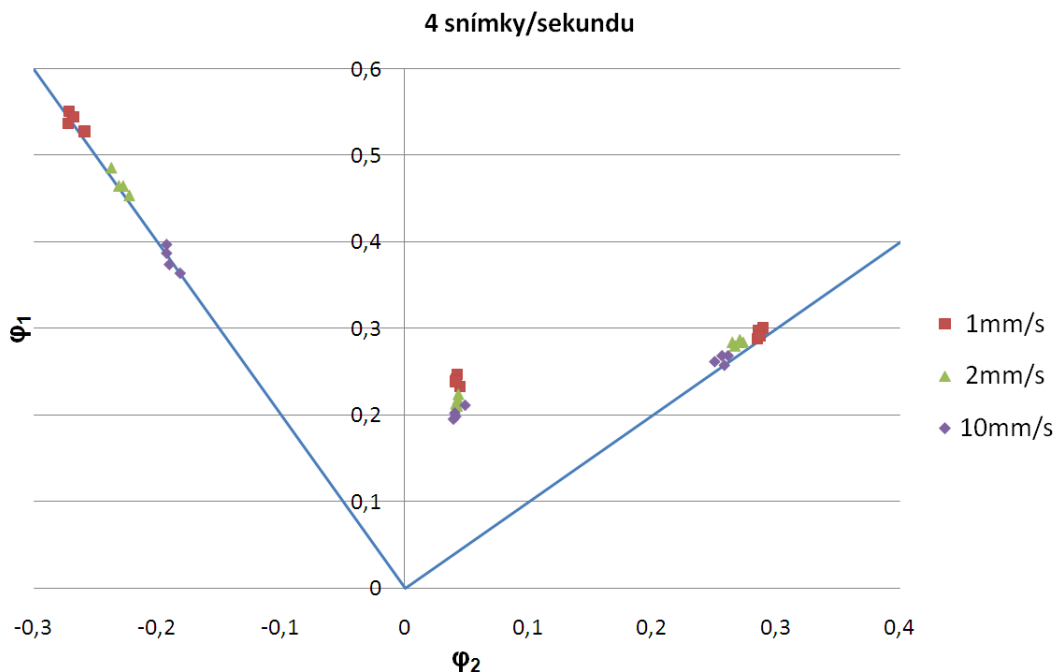
Obr. 3.3.6.8 Proložení inverzní parabolou a odečtení ϕ_2

3.3.7 Výsledky měření

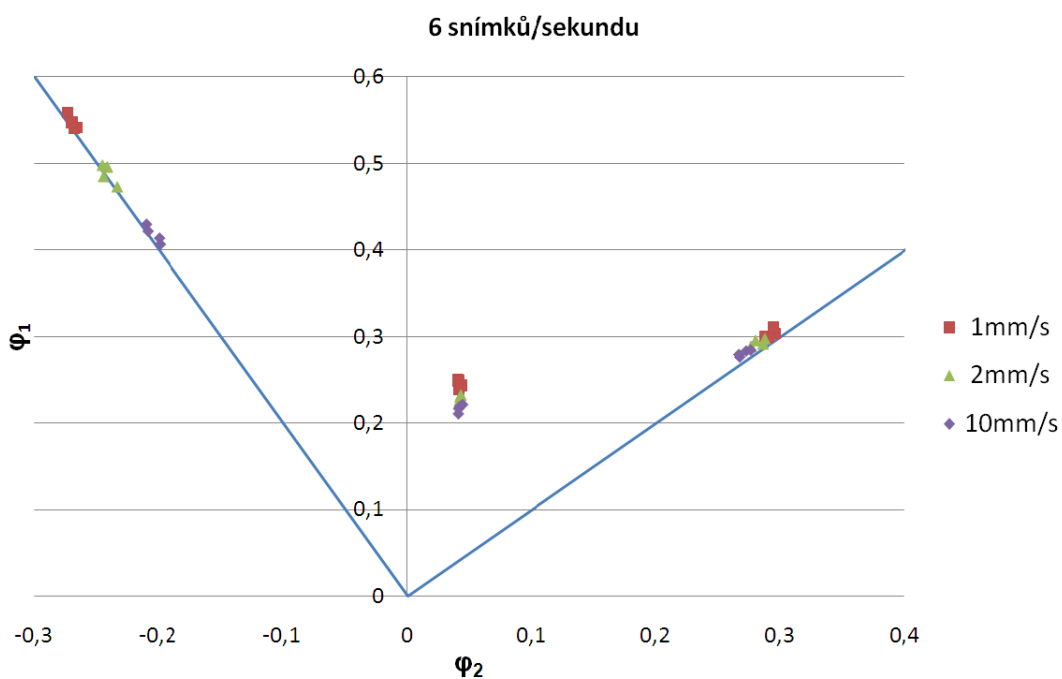
Pro každou podmínku (konstantní frekvence snímkování a konstantní rychlost tažníku) byl stanoven diagram mezních přetvoření ze souboru 12 vzorků. Pro názornost provedených experimentů jsou do jednoho grafu vyneseny vždy výsledky pro tři podmínky měření. Na obr. 3.3.7.1 až obr. 3.3.7.3 jsou diagramy mezních přetvoření za konstantní frekvence snímání a na obr. 3.3.7.4 až obr. 3.3.7.6 za konstantní rychlosti tažníku. Ukázky některých reportů pro různé podmínky měření jsou uvedeny v přílohách č.4. až č.12.



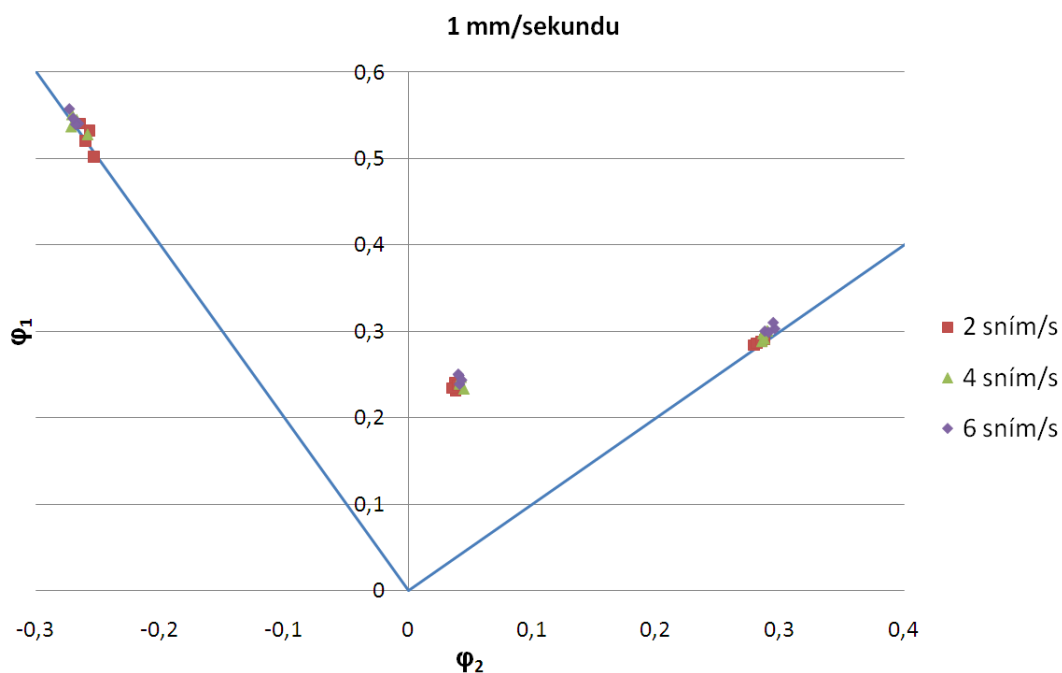
Obr. 3.3.7.1 Vliv rychlosti tažníku při frekvenci 2 snímky za sekundu



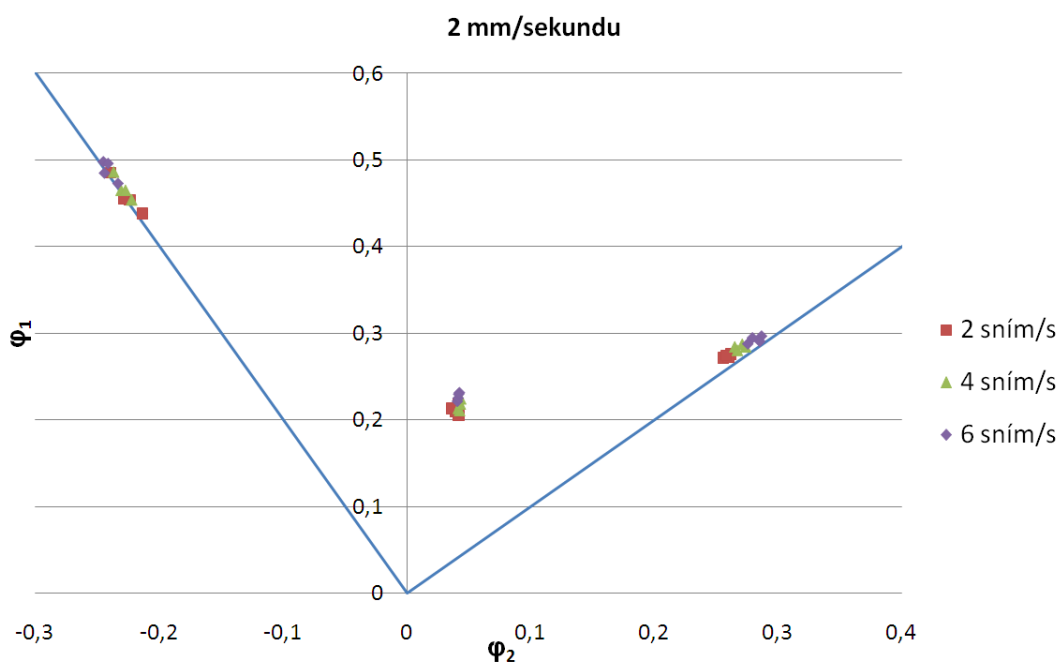
Obr. 3.3.7.2 Vliv rychlosti tažení při frekvenci 4 snímky za sekundu



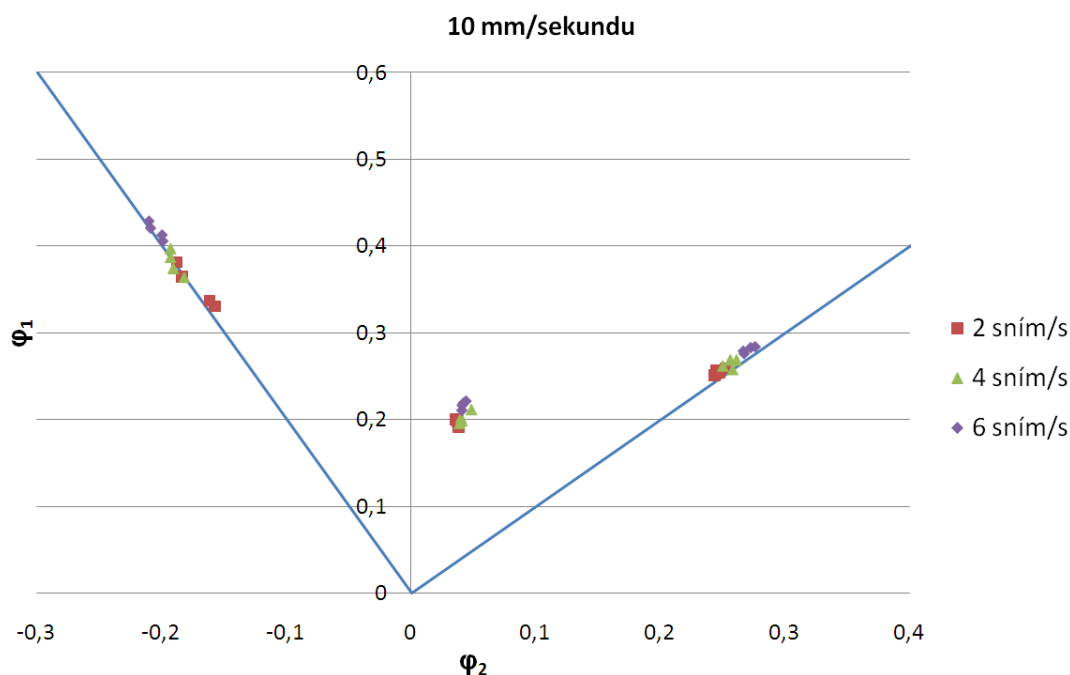
Obr. 3.3.7.3 Vliv rychlosti tažení při frekvenci 6 snímků za sekundu



Obr. 3.3.7.4 Vliv frekvence snímkování při rychlosti tvářecího nástroje
1 mm za sekundu



Obr. 3.3.7.5 Vliv frekvence snímkování při rychlosti tvářecího nástroje
2 mm za sekundu

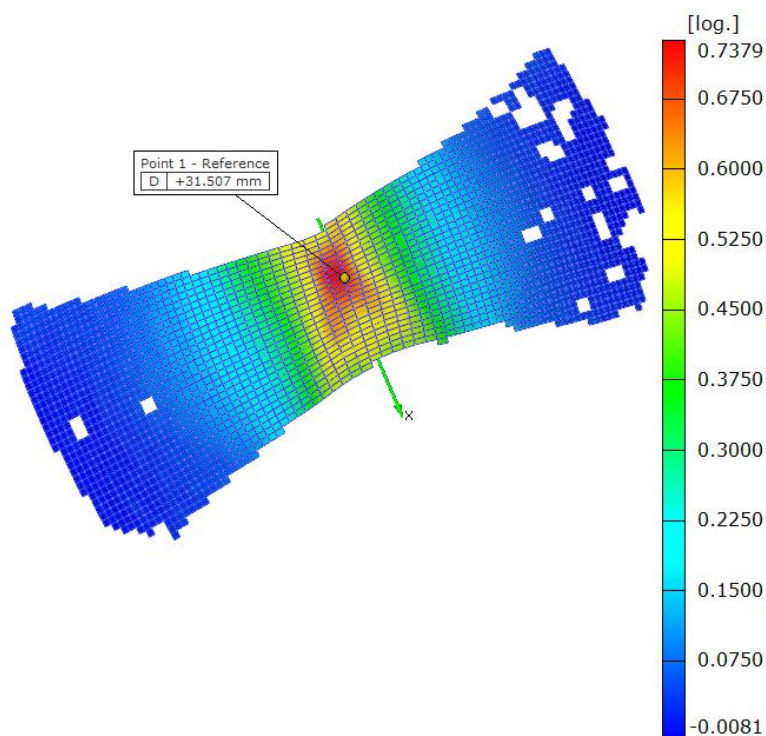


Obr. 3.3.7.6 Vliv frekvence snímkování při rychlosti tvářecího nástroje
10 mm za sekundu

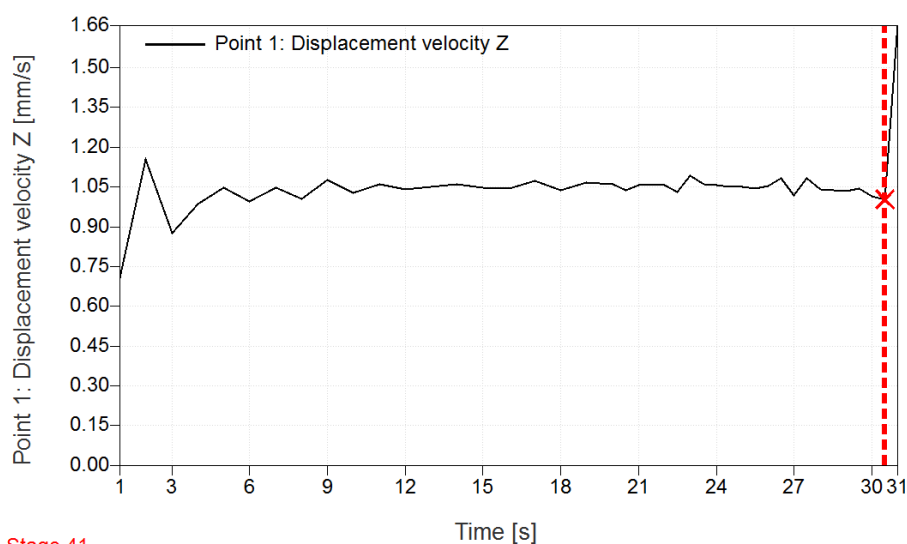
3.4 Ověření rychlosti tvářecího nástroje

3.4.1 Postup

Abychom zjistili, zda odpovídá skutečná rychlost tažníku nastavené rychlosti na stroji, byl zjištěn skutečný průběh rychlosti tvářecího nástroje. Na zkušební vzorek byl přibližně doprostřed umístěn bod, jak je vidět na obr. 3.4.1.1, jehož rychlost byla vynesena do grafu (viz. obr. 3.4.1.2), kde byla posléze odečtena. Na obr. 3.4.1.2 je ukázka průběhu skutečné rychlosti tvářecího nástroje při nastavené hodnotě rychlosti na stroji na 1 mm/s. Pro další rychlosti bylo postupováno stejným způsobem.



Obr. 3.4.1.1 Vynesení měřeného bodu na vzorku



ARAMIS

3/25/09

gom
www.gom.com

Obr. 3.4.1.2 Skutečný průběh rychlosti při nastavené rychlosti tvářecího nástroje na 1 mm/s

3.4.2 Výsledky měření

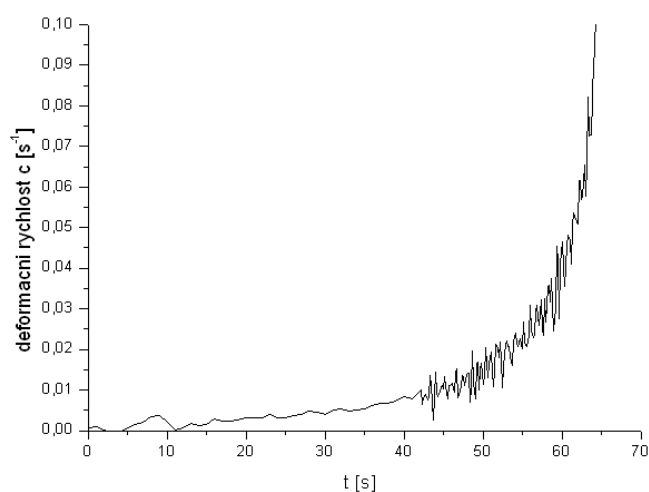
Do tabulky 3.4.2.1 byly zaznamenány skutečně naměřené rychlosti tvářecího nástroje v porovnání s nastavenými rychlostmi.

Tabulka 3.4.2.1 Porovnání nastavené a skutečné rychlosti tažníku

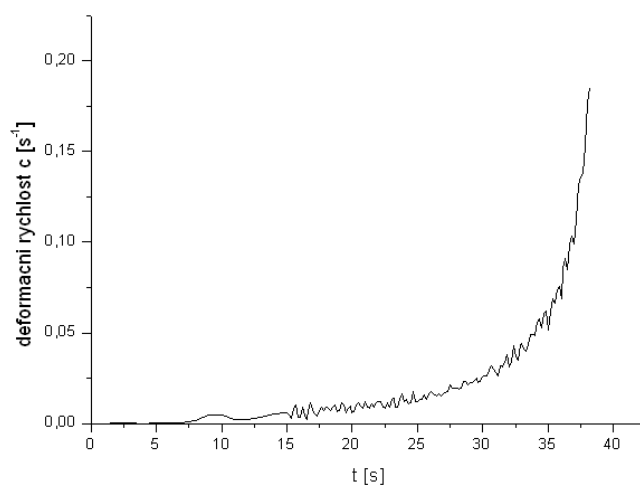
Rychlost tažníku	Nastavená [mm/s]	Skutečná [mm/s]
1.	1	1,05
2.	2	1,97
3.	10	9,68

3.5 Stanovení deformační rychlosti

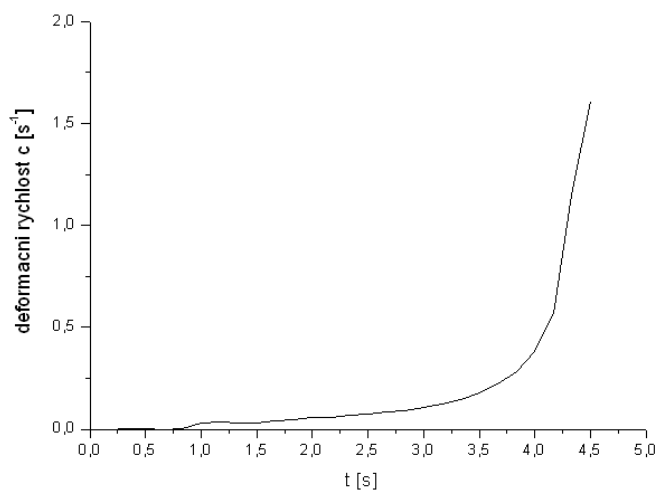
Deformační rychlosti tvářeného materiálu pro různé stavy napjatosti a různé rychlosti tvářecího nástroje byly stanoveny při frekvenci snímání 6 sním/s. Do grafu byl vynesena průběh hlavní deformace φ_1 v závislosti na čase, který byl derivován, a tím byl získán průběh deformační rychlosti \dot{c} pro φ_1 v závislosti na čase. Jednotlivé průběhy deformačních rychlostí jsou na obr. 3.5.1 až obr. 3.5.9.



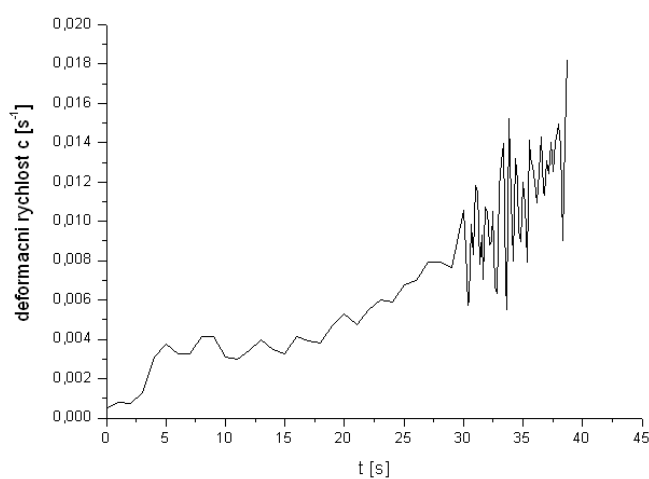
Obr. 3.5.1 Průběh deformační rychlosti ($b = 30$ mm, 6 sním/s, 1 mm/s)



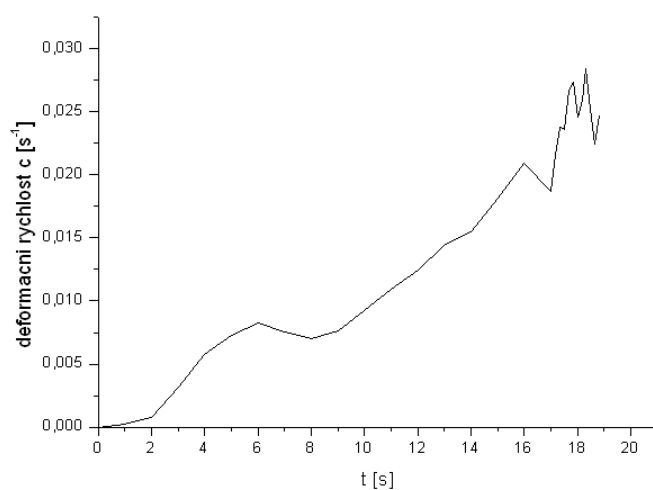
Obr. 3.5.2 Průběh deformační rychlosti ($b = 30 \text{ mm}$, 6 sním/s, 2 mm/s)



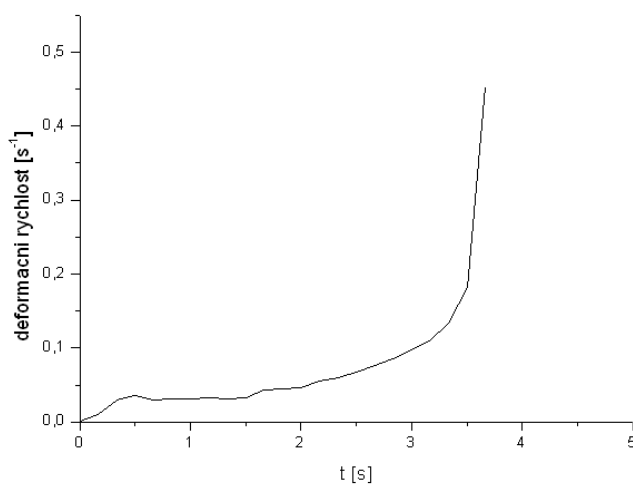
Obr. 3.5.3 Průběh deformační rychlosti ($b = 30 \text{ mm}$, 6 sním/s, 10 mm/s)



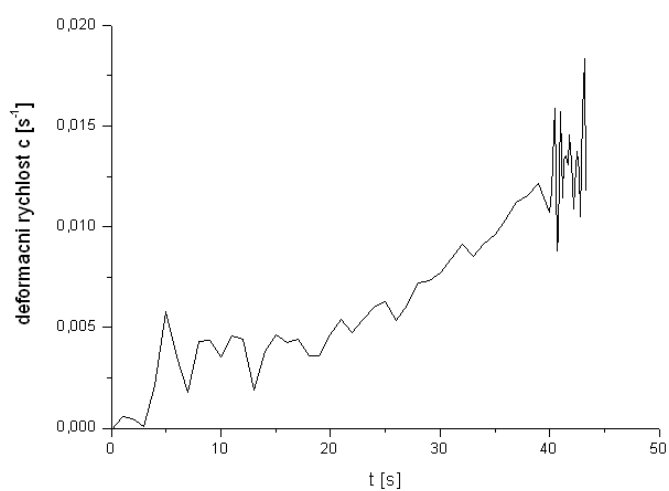
Obr. 3.5.4 Průběh deformační rychlosti ($b = 120 \text{ mm}$, 6 sním/s, 1 mm/s)



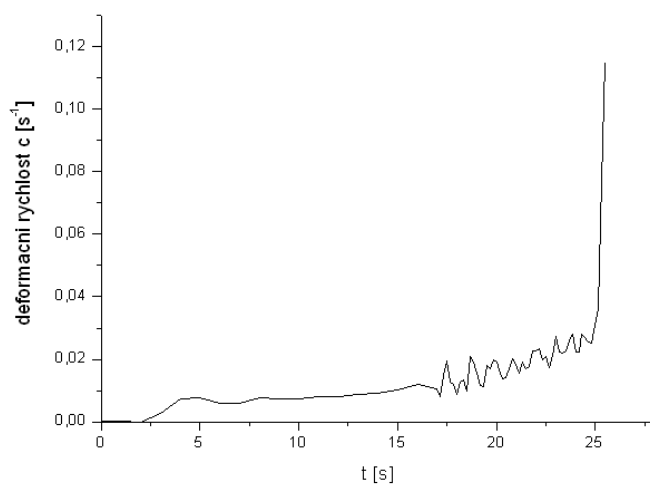
Obr. 3.5.5 Průběh deformační rychlosti ($b = 120$ mm, 6 sním/s, 2 mm/s)



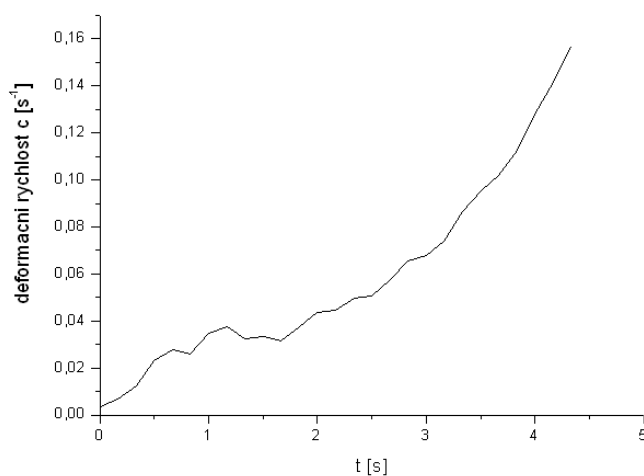
Obr. 3.5.6 Průběh deformační rychlosti ($b = 120$ mm, 6 sním/s, 10 mm/s)



Obr. 3.5.7 Průběh deformační rychlosti ($b = 210$ mm, 6 sním/s, 1 mm/s)



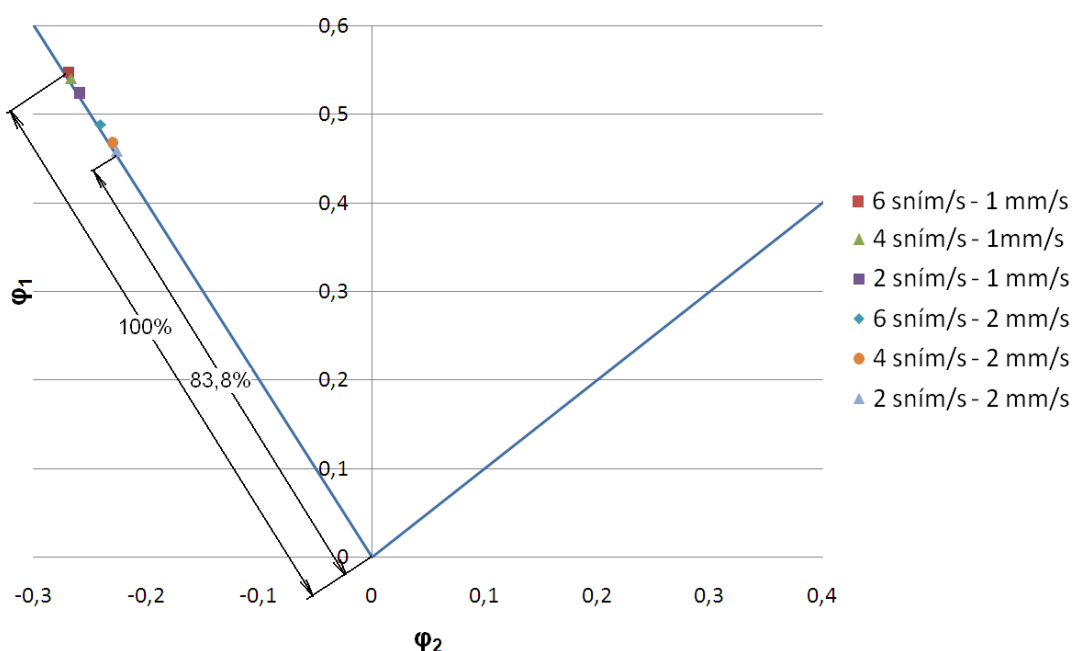
Obr. 3.5.8 Průběh deformační rychlosti ($b = 210$ mm, 6 sním/s, 2 mm/s)



Obr. 3.5.9 Průběh deformační rychlosti ($b = 210$ mm, 6 sním/s, 10 mm/s)

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Z naměřených výsledků je patrné, že frekvence snímkování systému ARAMIS při pořizování záznamu zkoušky ovlivňuje výsledek měření. Z prezentovaných grafů v kapitole 3.3.7 je vidět, že největší rozdíl ve výsledku mezní deformace dostáváme u vzorků o šířce $b = 30$ mm, které odpovídají deformační stopě $m_\varphi = -0,5$. Výsledek měření ovlivňuje i zvolená rychlost tažníku při zkoušce. Nejvyšší hodnoty mezní deformace pro všechny měřené deformační stopy byly zjištěny při podmínkách rychlosti tažníku 1 mm/s a frekvence snímkování 6 sním/s. Pro ostatní podmínky měření došlo k poklesu zjištěné mezní deformace. Pokud tuto nejvyšší mezní deformaci považujeme u každé deformační stopy za 100%, lze spočítat pro ostatní podmínky měření pokles vůči tomuto základu. V následujících tabulkách 4.1 až 4.3 je vždy vyjádřen pro každou deformační stopu pokles zjištěných mezních hodnot vůči tomuto základu. Výpočet těchto hodnot je patrný z obr. 4.1, kde je graficky vyjádřen pokles mezního stavu vzhledem k maximální hodnotě dosažené při výše uvedených podmínkách měření (1 mm/s a frekvence snímkování 6 sním/s).



Obr. 4.1 Pokles mezní deformace

Tabulka 4.1 Pokles poměrných mezních hodnot [%] pro $b = 30$ mm

$m_\phi = -0,5$ $b = 30$ mm	Rychlost pohybu tažníku		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	95,9	83,8	64,6
4 sním/s	98,8	85,5	69,7
6 sním/s	100,0	89,3	76,2

Tabulka 4.2 Pokles poměrných mezních hodnot [%] pro $b = 120$ mm

$m_\phi = 0$ $b = 120$ mm	Rychlost pohybu tažníku		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	96,2	86,6	80,2
4 sním/s	98,5	88,6	83,4
6 sním/s	100,0	92,9	88,9

Tabulka 4.3 Pokles poměrných mezních hodnot [%] pro $b = 210$ mm

$m_\phi = 1$ $b = 210$ mm	Rychlost pohybu tažníku		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	95,8	89,4	84,4
4 sním/s	97,8	93,0	87,7
6 sním/s	100,0	96,6	92,6

Absolutní hodnoty mezních deformací naměřených při experimentu jsou vidět v tabulkách 4.4 až 4.6, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných deformací (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru s . Obecně lze z výsledků uvedených v tabulkách 4.4 až 4.6 konstatovat, že snižováním frekvence snímkování a zvyšováním rychlosti tažníku nástroje se střední hodnoty mezní deformace snižují a zvyšují se směrodatné odchylky výběru s .

Pokud se zaměříme na podmínky měření DMP, které udává norma ISO/DIS 12004-2 [9] je vidět, že v „levé větvi“ DMP ($m_\phi = -0,5$) má rychlost posuvu tažníku a frekvence snímkování větší vliv na výsledek měření než v „pravé větvi“ ($m_\phi = 1$). Při dodržení podmínek měření daných normou

ISO/DIS 12004-2 [9] jsou maximální rozdíly v naměřených hodnotách mezní deformace v „levé větvi“ DMP ($m_\phi = -0,5$) 16,2 % v „pravé větvi“ DMP ($m_\phi = 1$) jsou 10,6 %.

Výsledky měření, které byly provedeny při rychlostech 10 mm/s se diametrálně odlišují od ostatních získaných výsledků a tuto rychlost pohybu tažníku nelze používat ani pro orientační zjištění DMP.

Tabulka 4.4 Absolutní hodnoty mezních deformací pro $b = 30$ mm

$b = 30$ mm	$\phi_1 [-]$			$\phi_2 [-]$		
	Rychlost tažníku [mm/s]			Rychlost tažníku [mm/s]		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	0,524	0,458	0,354	-0,259	-0,226	-0,172
	0,01434	0,01699	0,02063	0,00393	0,00924	0,01325
4 sním/s	0,540	0,468	0,38	-0,267	-0,23	-0,19
	0,00864	0,01159	0,01255	0,00527	0,00527	0,00451
6 sním/s	0,547	0,488	0,417	-0,269	-0,241	-0,204
	0,00717	0,00997	0,00861	0,00274	0,00465	0,0051

Tabulka 4.5 Absolutní hodnoty mezních deformací pro $b = 120$ mm

$b = 120$ mm	$\phi_1 [-]$			$\phi_2 [-]$		
	Rychlost tažníku [mm/s]			Rychlost tažníku [mm/s]		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	0,236	0,212	0,196	0,038	0,04	0,037
	0,00335	0,00517	0,00339	0,00157	0,00216	0,00102
4 sním/s	0,241	0,216	0,203	0,043	0,043	0,042
	0,00484	0,00522	0,00602	0,00139	0,00074	0,00374
6 sním/s	0,245	0,227	0,217	0,042	0,042	0,042
	0,00461	0,00389	0,00397	0,00103	0,00061	0,00133

Tabulka 4.6 Absolutní hodnoty mezních deformací pro $b = 210$ mm

b = 210 mm	φ_1 [-]			φ_2 [-]		
	Rychlost tažení [mm/s]			Rychlost tažení [mm/s]		
	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s	1 mm/s	2 mm/s	10 mm/s
2 sním/s	0,287	0,273	0,255	0,283	0,259	0,247
	0,00224	0,00167	0,00302	0,00329	0,00217	0,00331
4 sním/s	0,295	0,284	0,265	0,287	0,269	0,257
	0,00474	0,00249	0,00469	0,00162	0,00342	0,00398
6 sním/s	0,303	0,293	0,281	0,292	0,282	0,27
	0,00437	0,00349	0,0032	0,00315	0,0045	0,0039

Ze zjištěných průběhů deformační rychlosti je vidět, že rychlost deformace není konstantní v průběhu zkoušky. Nejvyšší gradient deformační rychlosti mají vzorky vytvářející výrazný krček (deformační stopa $m_\varphi = -0,5$). Pro vzorky vypínané je nárůst deformační rychlosti pozvolný.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv frekvence snímkování na výsledek měření mezní deformace při použití optického bezkontaktního systému ARAMIS. Rozsah provedených testů a volba podmínek měření vycházely z normy ISO/DIS 12004-2 [9]. Tato norma specifikuje provedení a vyhodnocení testu mezního stavu u plechů při různých stavech napjatosti (FLD). Vzhledem ke snaze testovat možnosti zařízení ARAMIS si tato diplomová práce nekladla za cíl naměřit FLD v plném rozsahu deformačních stop. Z tohoto důvodu byly pro experiment vybrány 3 charakteristické deformační stopy.

Z výsledků provedených experimentů a diskuze měření uvedených v předcházejících kapitolách diplomové práce je vidět, že otázka volby podmínek měření má zcela zásadní vliv na výsledek FLD. S rostoucím počtem frekvence snímkování se posouvá mezní stav materiálu k vyšším hodnotám. Tento jev je patrný i při snižování rychlosti pohybu tažníku. Oba tyto parametry zvyšují počet snímků, které zachycují mezní stav – okamžik vzniku trhliny. Norma ISO/DIS 12004-2 [9] specifikuje i způsob vyhodnocení získaných dat, kde je snaha oblast bezprostředně sousedící s trhlinou, a tudíž s největší deformací, eliminovat. Experiment prokázal přímou souvislost výsledku měření s volbou parametrů prováděného testu. Při konstantní frekvenci snímání dat 6 sním/s a volbě spodní a horní hranice rychlosti tažníku, které připouští norma ISO/DIS 12004-2 [9], je rozdíl ve výsledku mezní deformace v rozmezí cca 4-10% v závislosti na deformační stopě. Pro nižší frekvence snímání dat se tento rozdíl ještě zvyšuje. V současnosti je snaha navrhovat tvářecí operace tak, aby byly využity v maximální míře plastické vlastnosti zpracovávaných materiálů. Tento rozdíl mezní deformace materiálu, daný pouze odlišnými podmínkami měření, může být zásadní při návrhu některých složitých operací tažení. Výsledkem je pak výroba dobrého popřípadě zmetkovitého výrobku.

Pro další práci se systémem ARAMIS na katedře strojírenské technologie doporučuji provádět testy mezních stavů plechů při nejvyšší frekvenci snímání dat 6 sním/s a volit rychlost tažníku 1,5 mm/s.



Pro „levou větev“ FLD, kde je vliv rychlosti tažníku vyšší, by bylo vhodné volit rychlost pohybu tažníku 1 mm/s. Pro „pravou větev“ FLD lze připustit i rychlost pohybu tažníku na horní hranici povolených rychlostí tažení, tj. 2 mm/s. Mnou doporučená hodnota rychlosti tažníku 1,5 mm/s při provádění testu je kompromisem a zaručí stejné podmínky měření v celém rozsahu deformačních stop.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERARURY

- [1] BUCHAR, Z.: Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů [Habilitační práce], TU v Libereci 1996.
- [2] BUCHAR, Z.: Analýza přetvoření výlisku vnitřních dveří [Výzkumná zpráva], VŠST, Liberec 1994.
- [3] PETRUŽELKA J., BŘEZINA R.: Tvářitelnost kovových materiálů, VŠB-TUO, Ostrava 2001.
- [4] VOLEK A.: Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos [Diplomová práce], VUTBr, Brno 2008.
- [5] <<http://www.westcam.at> >, duben 2008.
- [6] <<http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/FRVS/atos.pdf> >, duben 2008.
- [7] <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main05.html>>, duben 2008.
- [8] <<http://www.mcae.cz>>, duben 2008.
- [9] ISO/DIS 12004-2. Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming limit curves – Part 2: Determination of forming limit curves in laboratoř.
- [10] EN 10292.
- [11] EN 10143.
- [12] ČSN – EN 10002-1. Kovové materiály. Statická zkouška tahem, 2002.



7 SEZNAM PŘÍLOH

1. Výstupní protokol z tahové zkoušky H 260 BD+Z 100 MB 0°
2. Výstupní protokol z tahové zkoušky H 260 BD+Z 100 MB 45°
3. Výstupní protokol z tahové zkoušky H 260 BD+Z 100 MB 90°
4. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 2 sním/s, b = 30 mm)
5. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 2 sním/s, b = 120 mm)
6. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 2 sním/s, b = 210 mm)
7. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 4 sním/s, b = 30 mm)
8. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 4 sním/s, b = 120 mm)
9. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 4 sním/s, b = 210 mm)
10. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 6 sním/s, b = 30 mm)
11. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 6 sním/s, b = 120 mm)
12. Report z měření (rychlost tažení = 2 mm/s, 6 sním/s, b = 210 mm)

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : H 260 BD+Z 100MB (dle EN 10292)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (20 x 0,7) mm - směr 0°

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

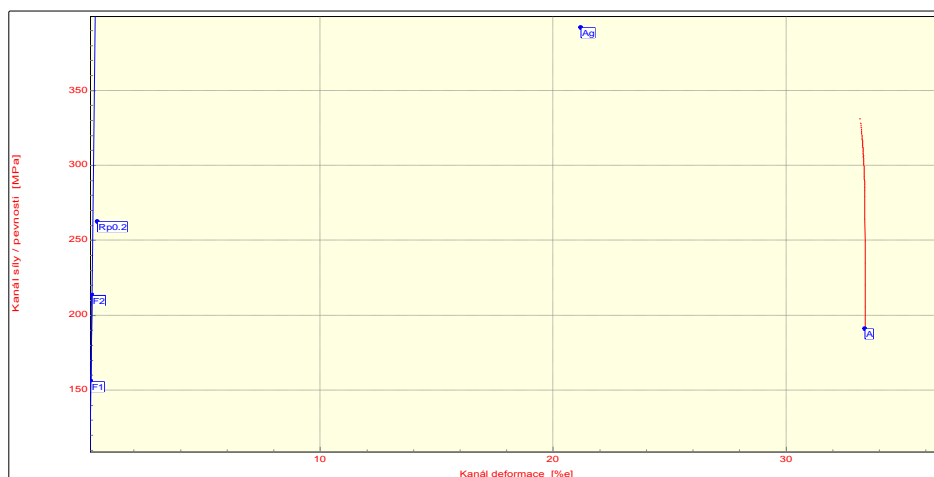
Vypracoval: : David Pospíchal

Datum zkoušky: : 6.2. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
1	260.06	389.96	33.09	20.81
2	267.67	392.11	33.63	20.88
3	262.28	391.77	33.23	20.83
4	259.60	388.23	34.12	20.89

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
Počet zkoušek	4	4	4	4
Průměrná hodnota	262.40	390.52	33.52	20.85
Směrodatná odchylka	3.70	1.79	0.46	0.04



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : H 260 BD+Z 100MB (dle EN 10292)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (20 x 0,7) mm - směr 45°

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

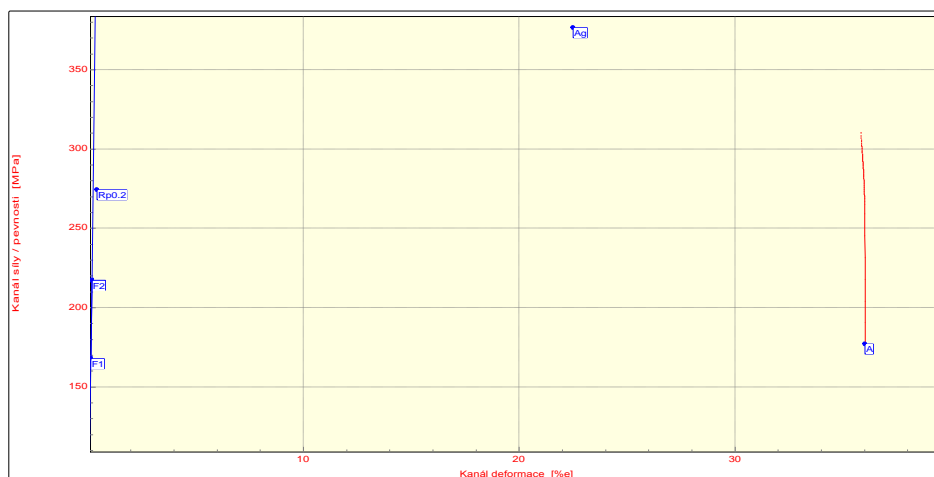
Vypracoval: : David Pospíchal

Datum zkoušky: : 6.2. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
1	275.43	377.38	34.16	20.76
2	274.07	376.28	35.89	22.16
3	274.14	378.72	36.07	20.98
4	270.08	378.18	36.14	21.79

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
Počet zkoušek	4	4	4	4
Průměrná hodnota	273.43	377.64	35.56	21.42
Směrodatná odchylka	2.32	1.06	0.94	0.66



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : H 260 BD+Z 100MB (dle EN 10292)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (20 x 0,7) mm - směr 90°

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

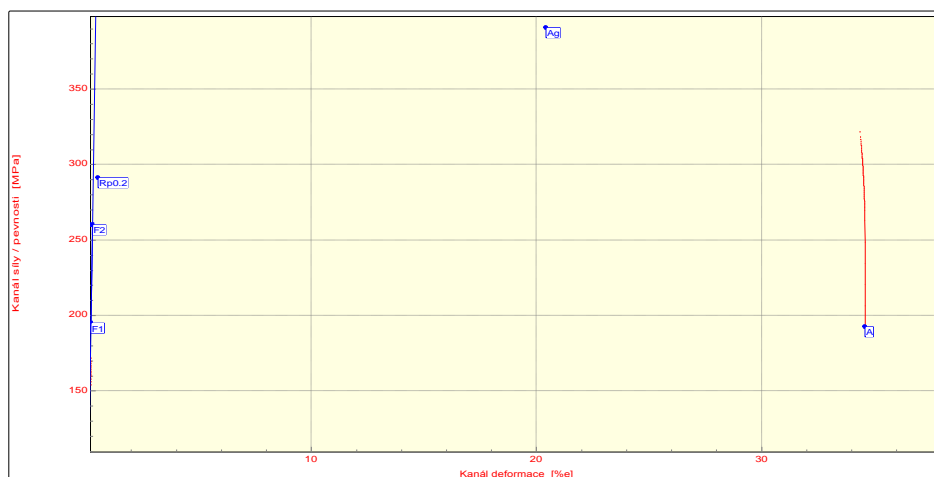
Vypracoval: : David Pospíchal

Datum zkoušky: : 6.2. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
1	286.74	390.12	33.08	20.08
2	290.88	390.86	33.11	20.19
3	290.99	390.54	34.39	20.01
4	290.13	391.03	32.76	19.67

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %	Ag %
Počet zkoušek	4	4	4	4
Průměrná hodnota	289.68	390.64	33.34	19.99
Směrodatná odchylka	2.00	0.40	0.72	0.22



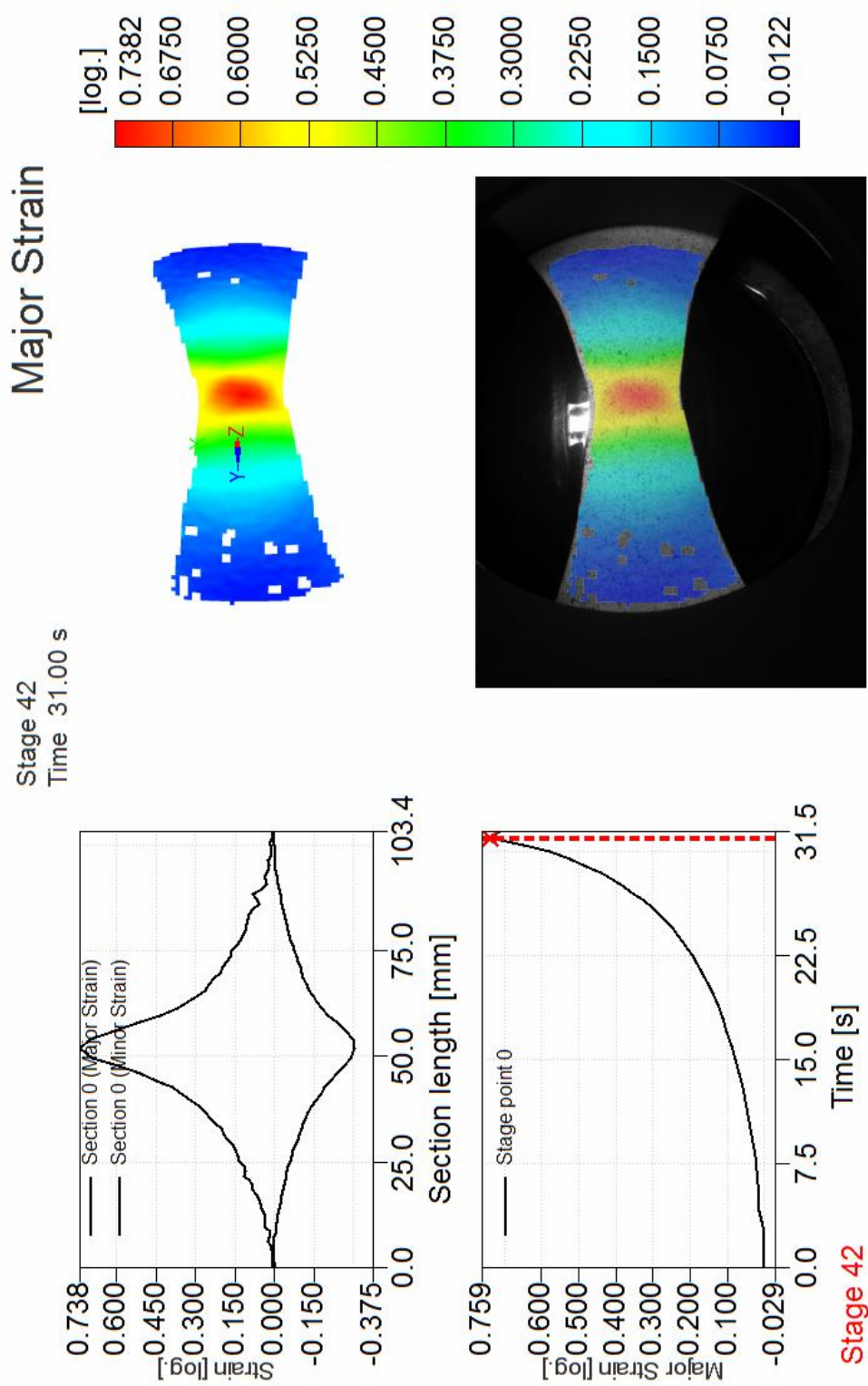
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

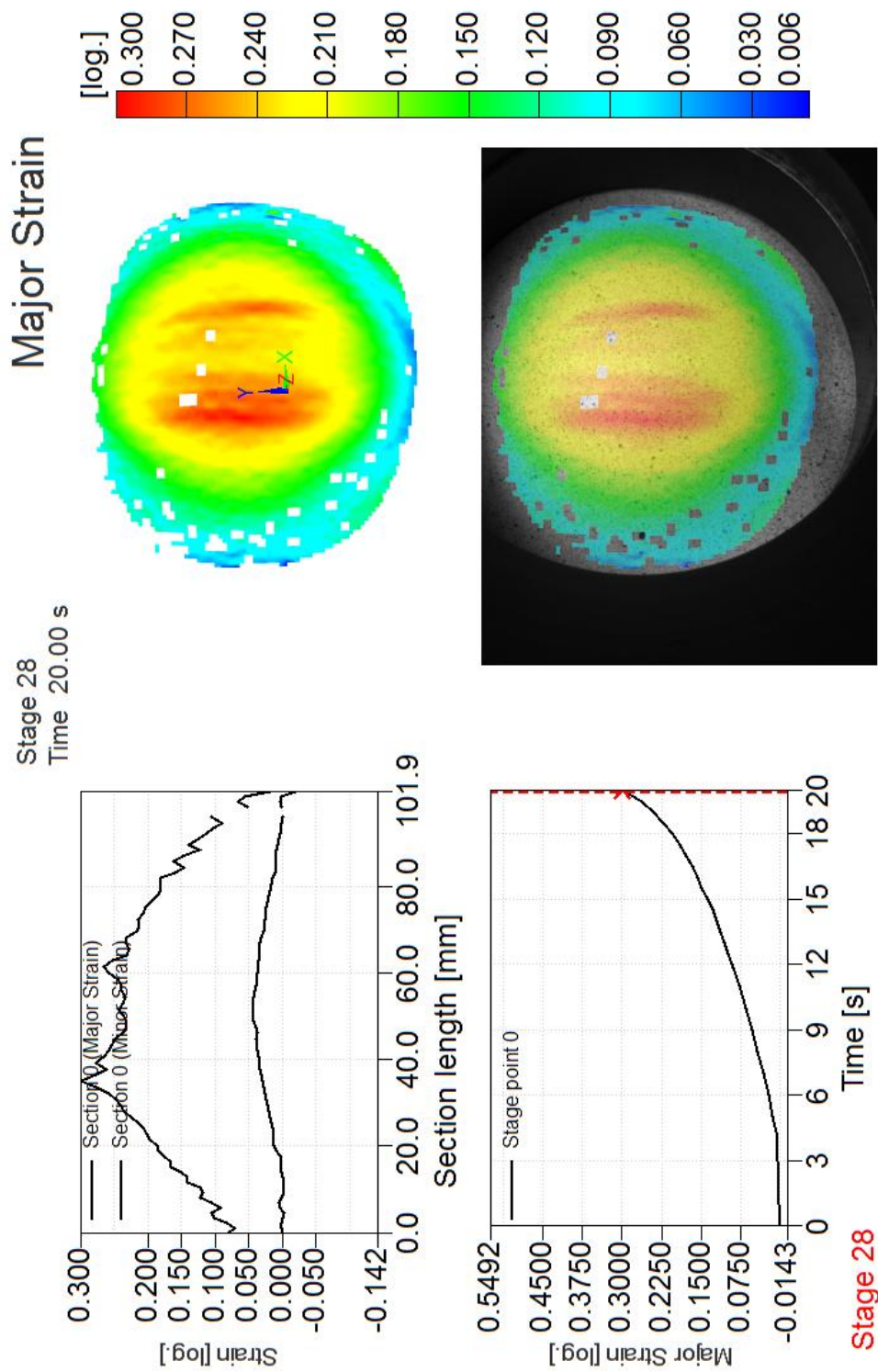
Oddělení tváření kovů a plastů

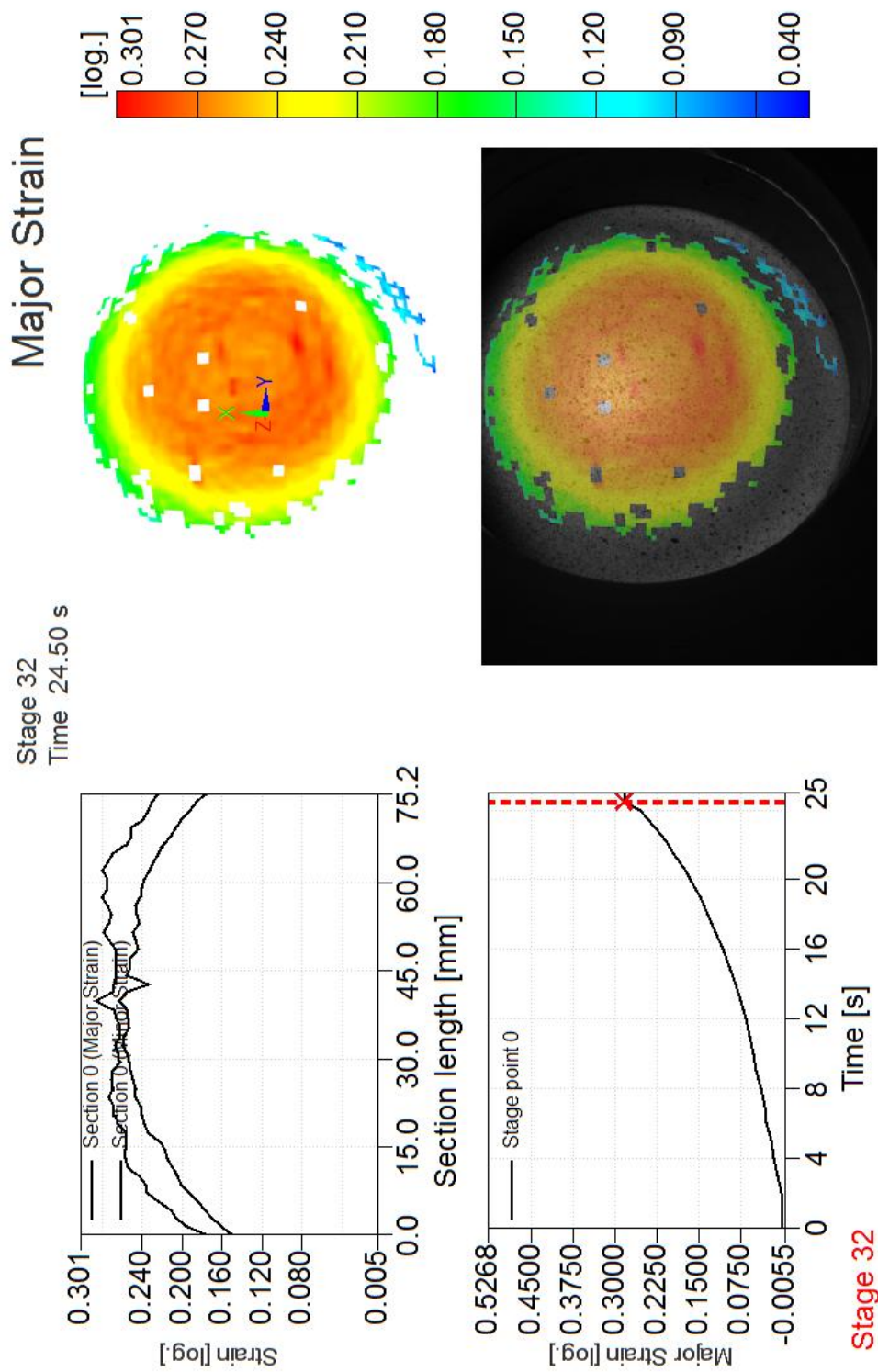
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

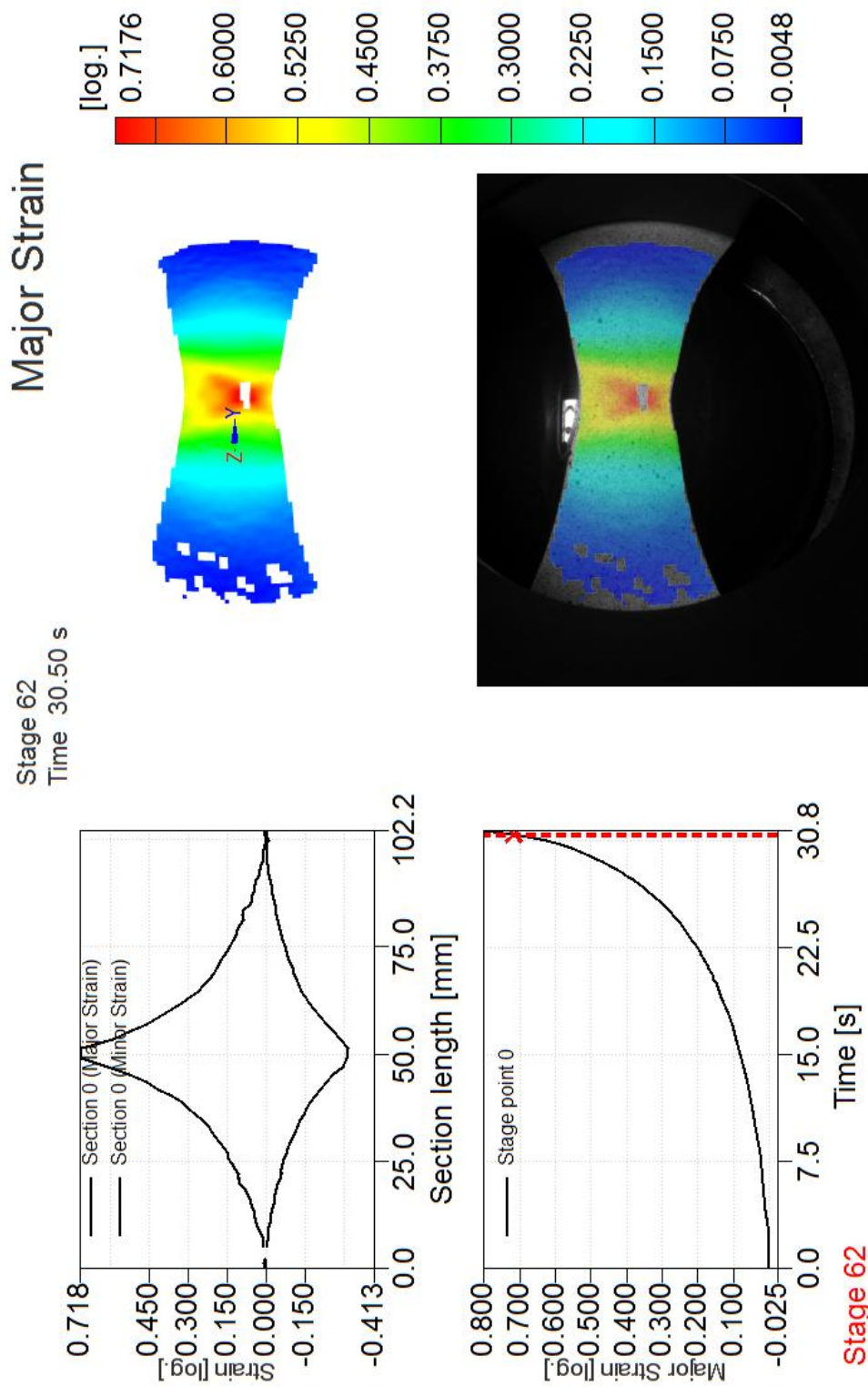
<http://www.ksp.tul.cz>



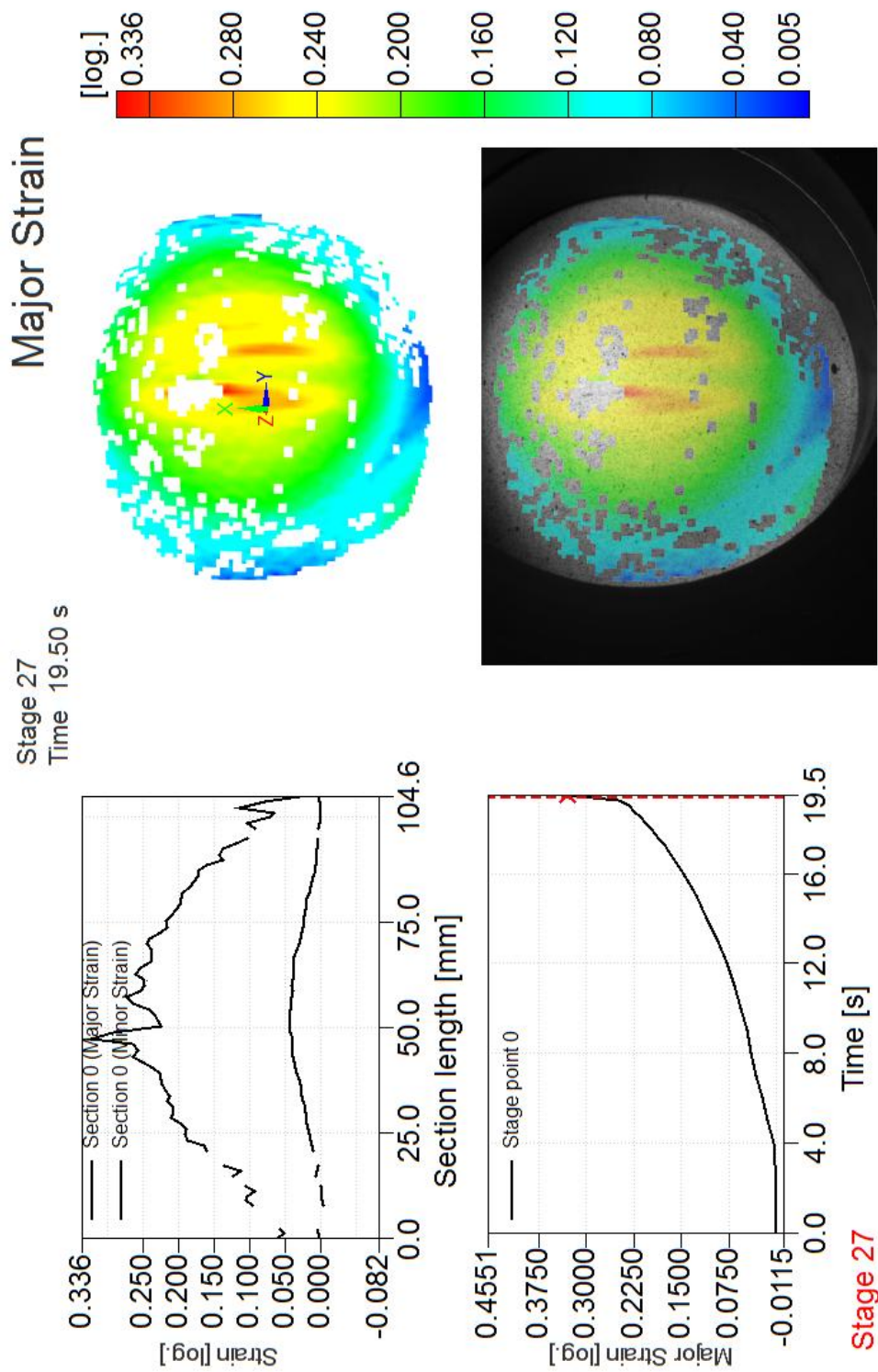
Příloha 4

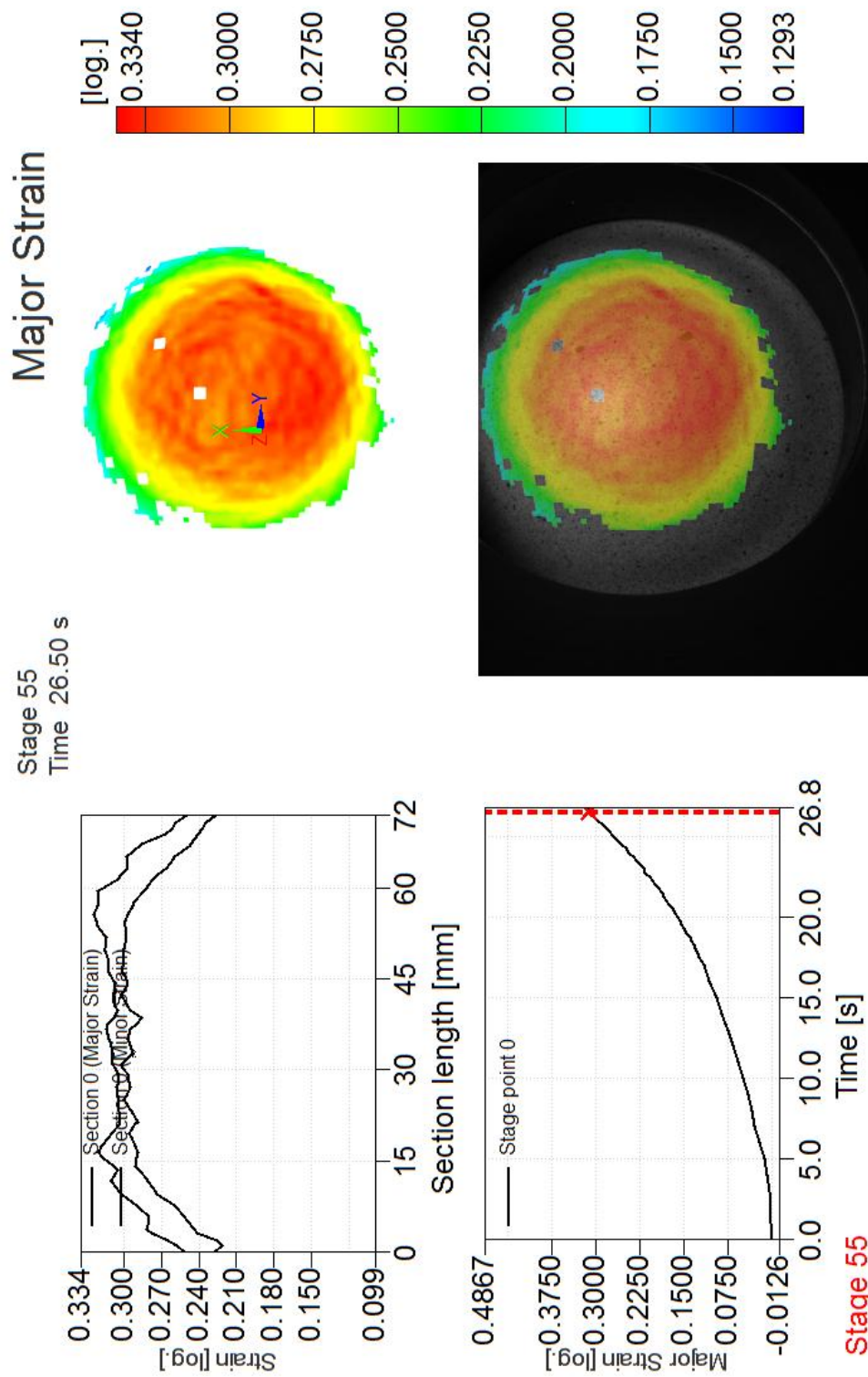


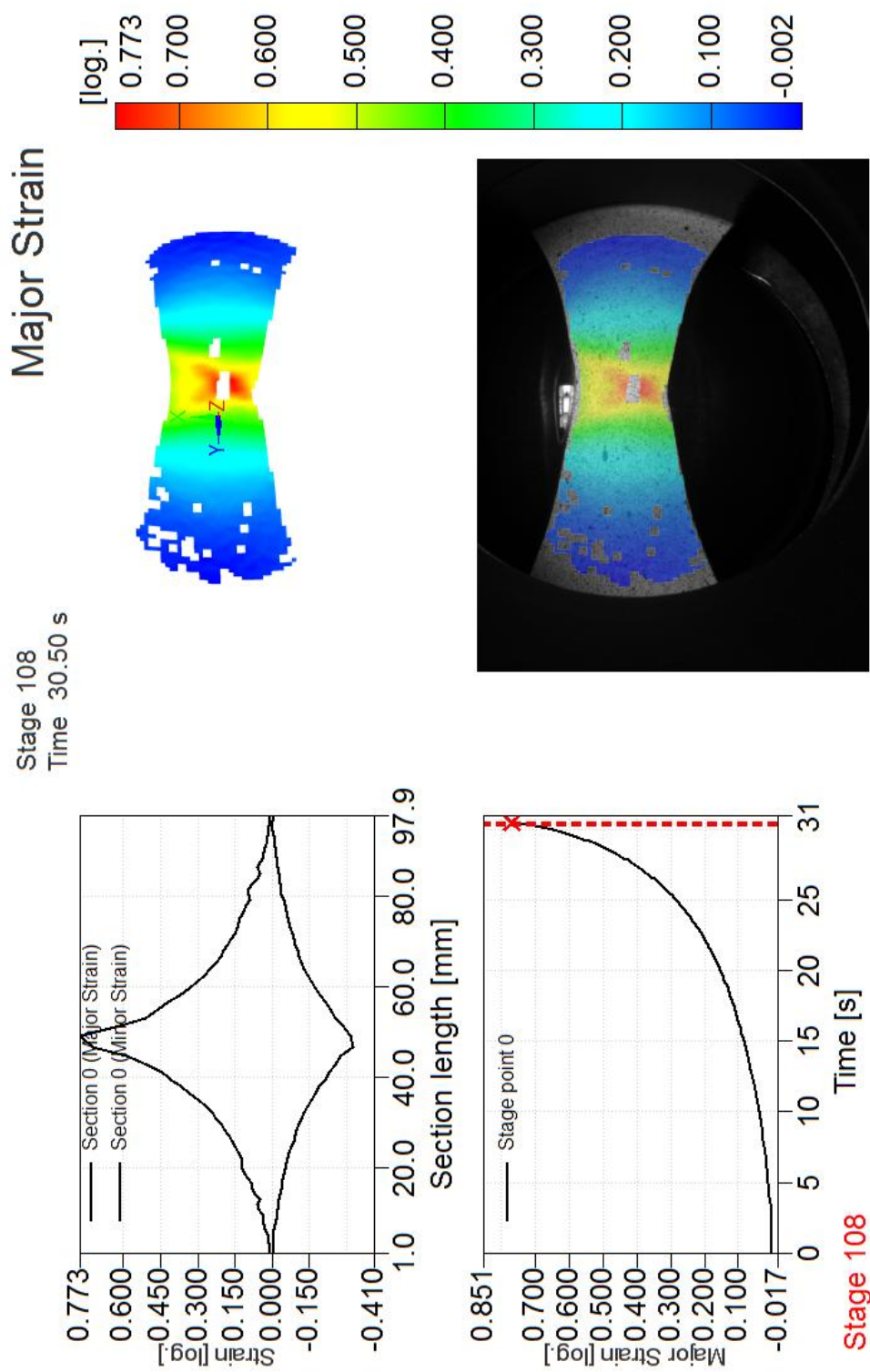


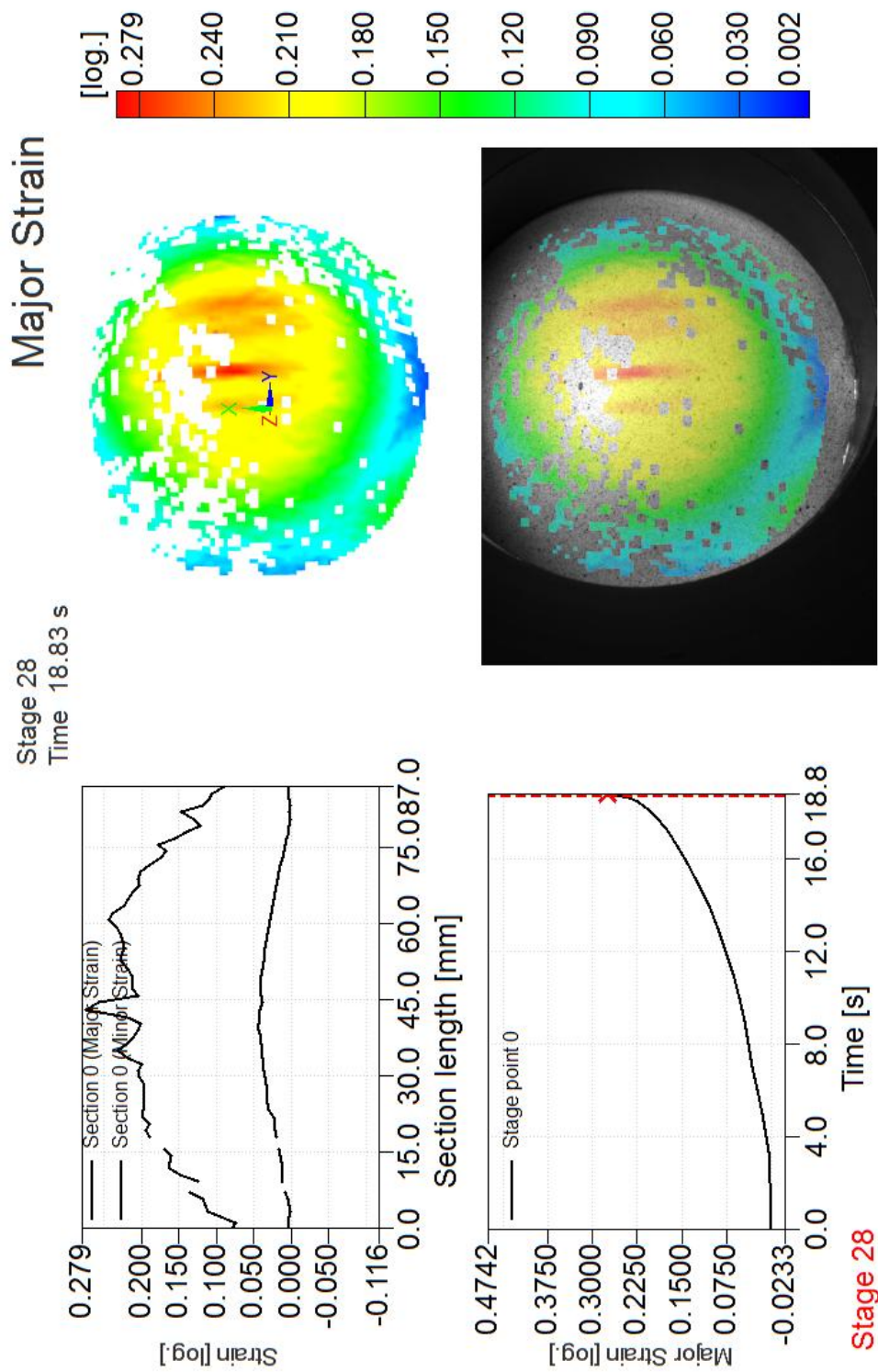


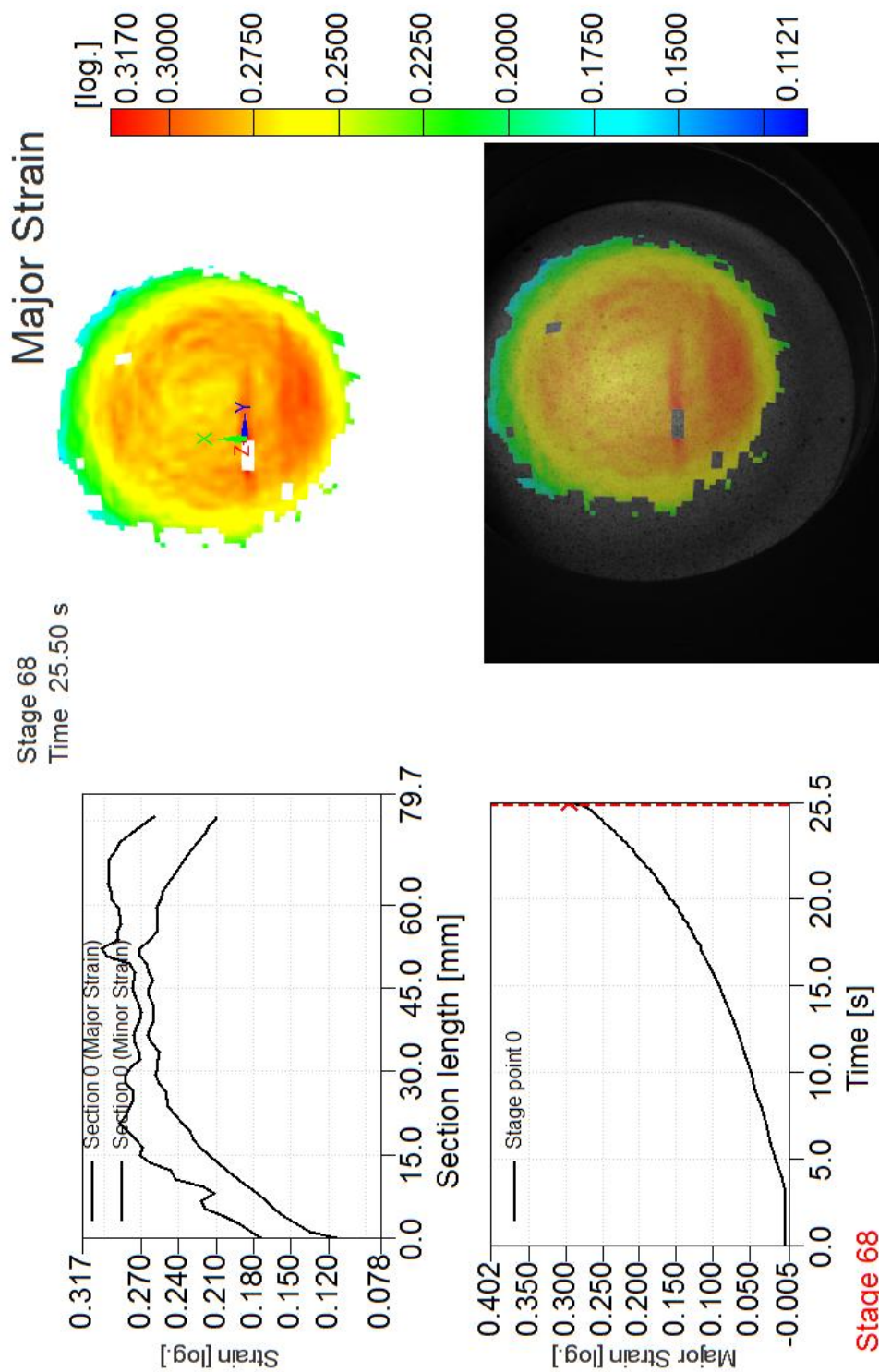
Příloha 7











Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 5.6.2009

.....

David Pospíchal

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

V Liberci, 5.6.2009

.....

David Pospíchal